

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS

UNA APROXIMACIÓN DINÁMICA Y  
ECOLÓGICA A LAS ESCALAS DE  
ADAPTACIÓN DEL  
COMPORTAMIENTO

TESIS PRESENTADA POR JORGE IBÁÑEZ GIJÓN  
PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN BIOFÍSICA

*Bajo la dirección de David Jacobs y Raoul Huys*



2014

Instituto Nicolás Cabrera





---

# Agradecimientos

Ninguna empresa digna de interés puede llevarse a cabo en solitario. Al primero que debo agradecer es a mi director de tesis, David Jacobs, por haber sabido ser mucho más que eso. Trabajador metódico, mente brillante y con juicio riguroso pero con una capacidad ilimitada para aprender, siempre ha estado dispuesto a discutir mis ideas más rocambolescas con una actitud tan crítica como receptiva. Si puede decirse que existen maestros en el oficio de científico, sin lugar a dudas David Jacobs sería un miembro de honor entre ellos. Muchas gracias sobre todo, por tu confianza y tu amistad. Igualmente, quisiera agradecer a David Travieso, el responsable de que Gibson entrase por mis venas para instalarse en el tuétano de mi pensamiento. Nunca olvidaré tu apoyo y tu confianza desde el día en que nos conocimos hace ya muchos años, como tampoco olvidaré las incontables discusiones en las que siempre aprendes algo nuevo. También quiero agradecer a Raoul Huys y Viktor Jirsa, por acojerme como uno más en su grupo, y por mostrarme mis límites en tantas ocasiones.

A mi pequeña gran familia, que siempre está conmigo no importa lo lejos que me vaya, y especialmente a mi madre, por su amor y su esfuerzo incondicionales, a mi hermano Ramón, que me abrió los ojos a un mundo fascinante y desde entonces no los he podido volver a cerrar. A todos, a los que están y a los que se fueron antes de que el telón bajase, os llevo en mi corazón. A Ivonne, mi compañera en el viaje que es la vida, porque me devuelves al mundo. A mis compañeros en el trabajo, tanto en Madrid como en Marsella, en especial a Marcos y a Denis, que le dieron otro significado a dos metros cuadrados, pero también a Alex, Lorena, Marmaduke, Dipanjan y Stuart. Y a mis compañeros de piso, con quienes siempre se comparte mucho más que cuatro paredes, especialmente a Sergio, amigo desde la noche de tiempos hasta que nos echen del local. Y a todos los demás que el espacio y el tiempo me impiden nombrar, muchas gracias.

---

# Overview

Psychology as a science was born in the middle of the idealistic ontological gap between the body (as a meaningless mechanism that passively receives orders), and mind (as a logical and ideal construct that gives intellectual meaning to the world according to its purposes). In this thesis I have presented reflections that aim to overcome the dichotomy between body and mind through revision of the object and methods of psychology. To this end, I propose the study of adaptive behavior as an emergent process in the functional coupling between organisms and their environments through concepts of ecological theory of perception.

Mechanicism cannot prevent its methodology to disintegrate its object of study. This paradigm is insensitive to the most fundamental process of an organism: the establishment of an autonomous historical identity. If we describe an organism from a structural perspective of its mechanism historical identity is blurred in the universality of the laws that governing them, and if we describe the organism from a symbolic perspective of its functions, autonomy fades into the arbitrariness of a formalism that only means to an observer with the knowlegde to interpret it.

In this thesis I propose an alternative scientific approach in which materiality, historical identity and autonomy of organisms are the fundamental properties that must be assumed and explained. The fundamental transition that distinguishes organisms from other natural processes is their ability to establish a history of adaptive interactions with their environment, which naturally appears in metabolic systems. In these systems, the homeostatic processes are organized so as to allow the preservation of the identity of the system, thus defining the perspective from which the system values its environment. In metabolic systems, meaning is not something that is extrinsically imposed on natural order. However, the metabolic and physiological processes of an organism are not the appropriate level to its relations with the environment. Instead, these relations are to be found

in the domain of the unitary experience of the organism, which is constituted in systems that establish an informational coupling with their environment.

In an informational coupling, the organism regulates its interactions with the environment based on the information in the structure of the ambient energy arrays, and under the coordination of the process of experience. To study this type of environmental interactions I adopt the ecological-dynamical approach, which frames the studies presented in this thesis. This approach portrays psychological experience from a materialist perspective but without reducing it to the physiological mechanisms on which it is based. The type of explanations proposed by the ecological-dynamical approach considers the adaptivity of behavior as the maintenance of informational specificity between environmental processes and organismal processes at multiple scales. Thus, the specificity between organism and environment is based on their reciprocal (dialectic) determination.

This thesis aims to show the validity of the ecological-dynamical approach by producing alternative explanations for classic phenomena in psychology from a variety of cognitive domains. I propose alternative explanations from the ecological-dynamical approach to three paradigmatic experimental phenomena within cognitivism: inhibition of return (in the domain of attention), Fitts' law (in the domain of motor control and learning), and the Müller-Lyer illusion (in the domain of perception and perceptual learning). Next, I briefly summarize the experimental and theoretical context of each investigation and the most important conclusions.

In Chapter 2, I consider the attentional phenomenon of inhibition of return, which is observed in tasks that analyze spatial orientation behavior using mental chronometry techniques. I propose to account for this phenomenon without using mentalistic and homuncular concepts such as the attentional focus, replacing them with a dynamical process that emerges from the sensory-motor coordination. In the presented model, the phenomenon of inhibition of return is the product of the reciprocal coupling of three dynamic processes operating on different time scales (sensation, habituation, and decision), but whose interactions conserve the metric relations of the task space in the metric relations of the behavioral and physiological fields.

In Chapter 3, I consider the behavioral adaptation to the constraints imposed by speed-accuracy trade-offs. The paradigmatic experiment to study this process is Fitts' task, whose results are formalized in the well-known Fitts' law. Fitts considered motor control as an information channel that connects afferent systems

and efferent systems. This metaphoric channel respects reciprocity in perception-action loops, but it assumes that the constraints in speed-accuracy trade-offs are intrinsic limitations in the information capacity of the sensori-motor channel. By contrast, from an ecological-dynamical perspective speed-accuracy trade-offs emerge from the behavioral dynamics that allow the organism to adapt to the environmental conditions so as to obtain the intended goals. In the experiment presented in this chapter, I use a novel task that allows me to propose a model of coupled nonlinear oscillators as a hypothesis to explain the behavioral dynamics that coordinate two speed-accuracy trade-offs. The task consists in simultaneously performing two reciprocal Fitts' tasks with both arms, under experimental instructions that emphasize different strengths of coupling between the oscillations of the arms. In addition to this dynamical model, I propose a regression model as a bimanual analogue to Fitts' unimanual law, summarizing the effects of task constraints on the kinematic magnitudes of movements.

In Chapter 4, I consider the phenomenon of perceptual learning in a length estimation task in the visual Müller-Lyer illusion. The existence of perceptual illusions has traditionally been considered as a fundamental problem for the consistency of the ecological approach. However, the ecological approach considers that perceptual illusions are characterized by the limitation of informational specificity as a consequence of the simplification of the natural constraints that organize the energy in the environment. In this chapter, I describe the potential-based and the direct approaches to learning, and illustrate how to obtain testable hypotheses from these approaches. The experimental results are consistent with the possibility that both approaches are partly correct, which is consistent with the proposal that learning involves a transition from an inferential (indirect) mode of apprehension to a perceptual (direct) mode of apprehension.

In Chapters 5 and 6, I discuss the utility of the ecological-dynamical approach in the fields of sport psychology and robotics through reviews of the major developments of the approach in these fields. The two areas have specific characteristics that make them good candidates to benefit from an ecological-dynamical approach. On the one hand, sports psychology is concerned with human activities that require the execution of behavior under extreme spatiotemporal constraints, in which the inferential processes are less relevant, and the coupling between perception and action becomes essential. On the other hand, behavioral robotics deals with the design of adaptive artificial systems. The concepts of the eco-

logical approach that I discuss as relevant to these disciplines are direct perception, information spaces, variability of practice and adaptive training methods, information-based control, prospective control, direct learning and action as a self-organized process.



---

# Resumen

La psicología como ciencia nació en medio de la fractura ontológica que la filosofía idealista estableció entre el cuerpo como un mecanismo sin sentido que recibe pasivamente órdenes, y la mente como un ente lógico e ideal que dota de sentido intelectual al mundo y lo organiza en función de sus propósitos. En esta tesis he planteado reflexiones que pretenden superar esa dicotomía entre cuerpo y mente a través de una reconsideración del objeto y los métodos de la psicología. Para ello, he propuesto el estudio del comportamiento adaptativo como un proceso emergente en el acoplamiento funcional entre los organismos y sus ambientes por medio de los conceptos de la teoría ecológica de la percepción.

El programa analítico y reduccionista del mecanicismo resuelve los problemas ontológicos del idealismo por medio de la relación estructura-función. Sin embargo, el mecanicismo es incapaz de evitar que su metodología desintegre el objeto mismo de su interés. Éste paradigma es insensible al proceso más fundamental de los organismos: el establecimiento de una identidad histórica autónoma. Si describimos a un organismo desde la perspectiva estructural de sus mecanismos, su identidad histórica se desdibuja en la universalidad de las leyes que los gobiernan, y si lo describimos desde una perspectiva simbólica de sus funciones, su autonomía se desvanece en la arbitrariedad de unos formalismos que sólo significan en función de un observador capaz de interpretarlos.

En esta tesis defiendo un enfoque científico alternativo en el que la materialidad, la identidad histórica y la autonomía de los organismos son las propiedades fundamentales que deben ser asumidas y explicadas. La transición fundamental que distingue a los organismos del resto de procesos naturales es la capacidad de establecer una historia de interacciones adaptativas con su entorno, que se constituye de manera natural en los sistemas metabólicos. En éstos sistemas los procesos homeostáticos se organizan para permitir la conservación de la identidad del sistema, delimitando de esta forma la perspectiva desde la que el sistema

significa su entorno. Así, en los sistemas metabólicos el significado no es algo que se haya de imponer extrínsecamente al orden natural. Sin embargo, la estructura metabólica y fisiológica de un organismo no es capaz de dar cuenta de sus relaciones con el entorno. Estas interacciones están en el dominio de la experiencia unitaria del organismo, que se constituye en sistemas que establecen una dialéctica informacional con su entorno.

En una dialéctica informacional, el organismo regula sus interacciones con el entorno en base a la información presente en la estructura de la energía en el ambiente. Para estudiar este tipo de interacción con el ambiente he considerado el enfoque ecológico y dinámico, desde el que se que enmarcan todos los estudios presentados en esta tesis. Este enfoque concibe la experiencia psicológica desde una perspectiva materialista pero sin reducirla a los mecanismos fisiológicos sobre los que se sustenta. En las explicaciones que propone el enfoque ecológico y dinámico, la adaptatividad del comportamiento consiste en el mantenimiento de la especificidad informacional a múltiples escalas entre los procesos ambientales y los procesos orgánicos. Así, la especificidad entre organismo y ambiente se sustenta en la determinación recíproca en la que ambos se constituyen.

El objetivo de esta tesis es mostrar la suficiencia y madurez del enfoque ecológico y dinámico a través de su contrastación con fenómenos clásicos de la psicología de corte representacionista que competen a una variedad dominios cognitivos o facultades psicológicas. Así, en esta tesis propongo explicaciones alternativas desde el enfoque ecológico y dinámico a tres fenómenos experimentales paradigmáticos dentro del cognitivismo: la inhibición de retorno (que pertenece al dominio de la atención), la ley de Fitts (que pertenece al dominio del control y el aprendizaje motor) y la ilusión de Müller-Lyer (que pertenece al dominio de la percepción y el aprendizaje perceptivo). A continuación resumo brevemente el contexto experimental y teórico de cada trabajo y las conclusiones más relevantes que he obtenido.

En el Capítulo 2, considero el fenómeno atencional de la inhibición de retorno, que se observa en tareas que analizan el comportamiento de orientación espacial por medio de técnicas de cronometría mental. Nuestra propuesta para dar cuenta de este fenómeno evita el uso del concepto mentalista y homuncular de foco atencional, y lo sustituye por un proceso dinámico emergente en la coordinación sensorio-motora. En nuestro modelo, el fenómeno de inhibición de retorno es el producto del acoplamiento de tres procesos dinámicos que operan en escalas

---

temporales distintas (sensación, habituación y decisión) pero cuyas interacciones conservan las relaciones métricas del espacio de la tarea en las relaciones métricas de los procesos dinámicos.

En el Capítulo 3, considero los procesos de adaptación comportamental a las restricciones impuestas por el compromiso entre velocidad y precisión al sistema motor. El modelo experimental paradigmático para estudiar este proceso es la tarea de Fitts, cuyos resultados fueron formalizados en la conocida ley de Fitts. Fitts considera el control motor como un canal de información que conecta sistemas aferentes con sistemas eferentes. Esta metáfora respeta la reciprocidad del bucle-percepción acción, pero asume que el compromiso expresado en la ley de Fitts se debe a las limitaciones de procesamiento de información intrínsecas al organismo. Por el contrario, desde una perspectiva ecológica y dinámica, el compromiso velocidad-precisión emerge como la dinámica comportamental que permite al organismo adaptarse a las condiciones de su entorno para obtener unas metas definidas desde el proceso de la experiencia. En el experimento que presento en este trabajo, utilizo una tarea inédita que me permite proponer un modelo de osciladores no-lineales como hipótesis para explicar el compromiso velocidad-precisión. La tarea consiste en la coordinación de dos tareas de Fitts continuas simultáneamente con los dos brazos, bajo instrucciones experimentales que enfatizan distintas intensidades de acoplamiento entre las oscilaciones de los brazos. Igualmente, propongo un modelo de regresión análogo a la ley de Fitts que es capaz de resumir los efectos de las restricciones de la tarea sobre las magnitudes cinemáticas del movimiento.

En el Capítulo 4, considero el fenómeno del aprendizaje perceptivo en una tarea de estimación de longitudes en la ilusión visual de Müller-Lyer. La existencia de ilusiones perceptivas ha sido considerada tradicionalmente como un problema fundamental para la consistencia del enfoque ecológico. Sin embargo, en el enfoque ecológico se considera que lo característico de las ilusiones perceptivas es que la especificidad informacional está limitada debido a la simplificación de las restricciones naturales que organizan la energía en el ambiente. En este trabajo describo los enfoques del aprendizaje basados en potencial y directos e ilustro cómo obtener hipótesis verificables de estos enfoques para una tarea de estimación visual de la longitud de una ilusión Müller-Lyer. Los resultados obtenidos son compatibles con la posibilidad de que ambas sean parcialmente correctas, lo va en línea con la propuesta de que el aprendizaje implica una transición de un

modo de aprehensión inferencial (indirecto) a un modo de aprehensión perceptivo (directo).

En los Capítulos 5 y 6 discuto la utilidad del enfoque ecológico y sistémico en los ámbitos de la psicología del deporte y de la robótica a través de una revisión de los principales desarrollos del enfoque en estas disciplinas. Los dos ámbitos tienen características específicas que los convierten en buenos candidatos para aplicar el enfoque ecológico dinámico. Por un lado, la psicología deportiva se preocupa por actividades humanas que requieren el desarrollo de comportamientos en condiciones extremas de restricción espacial y temporal, en los que los procesos inferenciales pasan a un segundo plano, y el acoplamiento entre percepción y acción se convierte en esencial para el comportamiento. Por otro lado, la robótica comportamental se ocupa del diseño de sistemas artificiales adaptativos. Entre los conceptos del enfoque ecológico que discuto como relevantes para estas disciplinas se encuentran la percepción directa, los espacios informacionales, la variabilidad en la práctica y los métodos de entrenamiento adaptativos, el control basado en información, el control prospectivo, el aprendizaje directo y la acción como un proceso auto-organizado.

---

# Publications

- Ibáñez-Gijón, J., Huys, R., Jacobs, D. M., & Jirsa, V. K. (in preparation). Bi-manual Fitts': A dynamical characterization of interlimb coordination under speed and accuracy constraints. Chapter 3 of this thesis.
- Ibáñez-Gijón, J., Díaz, A., Lobo, L., & Jacobs, D. M. (2013). On the ecological approach to information and control for roboticists. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(265), doi:10.5772/55671. Chapter 6 of this thesis.
- Ibáñez-Gijón, J. & Jacobs, D. M. (2012). Decision, sensation, and habituation: A multi-layer dynamic field model for inhibition of return. *PLoS ONE*, 7(3), e33169. doi:10.1371/journal.pone.0033169. Chapter 2 of this thesis.
- Ibáñez-Gijón, J. (2012). Lo psicológico en una teoría enactivista de la agencia. In: Diéguez, A., et al., (eds.). *Actas del I Congreso de la Asociación Iberoamericana de Filosofía de la Biología* (pp. 78-87). Publicacions de la Universitat de València. ISBN:978-84-370-9040-5.
- Ibáñez-Gijón, J., Travieso, D., & Jacobs, D. M. (2011). El enfoque neogibsoniano como marco conceptual y metodológico para el diseño de programas de entrenamiento deportivo. *Revista de Psicología del Deporte*, 20, 667-688. Chapter 5 of this thesis
- Jacobs, D. M., Ibáñez-Gijón, J., Díaz, A., & Travieso, D. (2011). On potential-based and direct movements in information spaces. *Ecological Psychology*, 23(2), 123-145. Chapter 4 of this thesis.
- Ibáñez, J., Travieso, D., Jacobs, D., & Fernández, M. (2010). Towards a dynamic field model of inhibition of return [abstract]. *International Journal of Sport Psychology*, 41, 77-78.

---

# Contents

<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Overview</b>	<b>5</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Publications</b>	<b>13</b>
<b>1 Introducción General</b>	<b>21</b>
1.1 Notas históricas sobre el estudio del comportamiento . . . . .	23
1.1.1 John Dewey: El concepto de arco reflejo en psicología . . .	24
1.1.2 Teoría sistémica y cibernética: Holismo en sistemas regula- torios . . . . .	26
1.1.3 Formalismos recursivos para los procesos regulatorios . . .	32
1.2 Una perspectiva unificadora de las escalas de adaptación . . . . .	38
1.2.1 La jerarquía estructural de Simon y el concepto episte- mológico de emergencia . . . . .	39
1.2.2 La perspectiva del colectivo y el concepto ontológico de emergencia . . . . .	41
1.2.3 Modos de la dialéctica ambiental . . . . .	47
1.2.4 Coordinación multi-escala de los modos dialécticos . . . . .	60
1.3 Psicología ecológica . . . . .	64
1.3.1 La psicología estructural de la tercera persona . . . . .	64
1.3.2 Naturalizando la psicología de la primera persona: affor- dances y escala ecológica . . . . .	65
1.3.3 La percepción directa . . . . .	68
1.3.4 Acción como sinergia autoorganizada bajo el control infor- macional . . . . .	69

1.3.5	Resumen: Comportamiento como especificidad ecológica multi- escala . . . . .	71
1.4	Resumen de los capítulos . . . . .	71
<b>2</b>	<b>Attention as a Dynamical System</b>	<b>77</b>
2.1	Introduction . . . . .	78
2.2	Modeling . . . . .	80
2.2.1	Dynamic field models and IOR . . . . .	80
2.2.2	Model equations . . . . .	81
2.3	Methods . . . . .	85
2.4	Results . . . . .	87
2.4.1	Simulating behavioral data . . . . .	87
2.4.2	Simulating neurophysiological data . . . . .	89
2.4.3	The effect of habituation . . . . .	92
2.4.4	The effect of temporal expectation . . . . .	93
2.5	Discussion . . . . .	94
<b>3</b>	<b>Action as a Dynamical System</b>	<b>97</b>
3.1	Introduction . . . . .	98
3.2	Material & Methods . . . . .	102
3.2.1	Participants, apparatus, and task . . . . .	102
3.2.2	Experimental design . . . . .	103
3.2.3	Data analysis . . . . .	104
3.3	Results . . . . .	110
3.3.1	Movement coordination . . . . .	110
3.3.2	Movement kinematics . . . . .	112
3.3.3	Bimanual Fitts' law . . . . .	116
3.3.4	Movement dynamics . . . . .	120
3.3.5	Dynamical model of $\theta$ . . . . .	125
3.4	Discussion . . . . .	134
<b>4</b>	<b>Perception as a Dynamical System</b>	<b>141</b>
4.1	Introduction . . . . .	142
4.2	Experiment 1 . . . . .	149
4.2.1	Method . . . . .	150
4.2.2	Results . . . . .	151

4.2.3	Discussion . . . . .	152
4.3	Experiment 2 . . . . .	153
4.3.1	Method . . . . .	155
4.3.2	Results . . . . .	156
4.3.3	Discussion . . . . .	157
4.4	Experiment 3 . . . . .	158
4.4.1	Method . . . . .	158
4.4.2	Results . . . . .	159
4.4.3	Discussion . . . . .	161
4.5	General discussion . . . . .	162
4.5.1	The time-scales of perception and action and of change in variable use . . . . .	162
4.5.2	Modes of apprehension and modes of learning? . . . . .	163
<b>5</b>	<b>Aplicaciones a las Ciencias del Deporte</b>	<b>165</b>
5.1	Introducción . . . . .	166
5.2	La riqueza informacional como punto de partida . . . . .	167
5.2.1	La percepción directa y el concepto de especificidad . . . .	167
5.2.2	Variables de alto orden y sistemas perceptivos inteligentes	169
5.2.3	Especificidad informacional y restricciones . . . . .	171
5.3	El aprendizaje perceptivo y perceptivo-motor . . . . .	173
5.3.1	La educación de la intención, la educación de la atención, y la calibración . . . . .	173
5.3.2	Implicaciones en los métodos de entrenamiento: primera ronda . . . . .	175
5.4	Un análisis continuo de la educación de la atención . . . . .	177
5.4.1	Espacios informacionales . . . . .	178
5.4.2	Mecanismos de aprendizaje . . . . .	181
5.4.3	Implicaciones en los métodos de entrenamiento: segunda ronda . . . . .	184
5.5	Fuera de juego, variabilidad y métodos adaptativos . . . . .	185
5.5.1	El uso de variables no específicas y estimaciones de fuera de juego . . . . .	185
5.5.2	Variabilidad en las condiciones de entrenamiento . . . . .	187
5.5.3	Métodos adaptativos . . . . .	188
5.6	Conclusiones . . . . .	189



---

<b>6</b>	<b>Applications to Robotics</b>	<b>190</b>
6.1	Introduction . . . . .	191
6.2	Visual system and direct perception . . . . .	192
6.3	Perception-action loops as control laws . . . . .	195
6.4	A robotic implementation of visually guided locomotion . . . . .	196
6.5	Prospective control . . . . .	198
6.6	Learning of visually guided action . . . . .	200
6.7	Direct Learning . . . . .	203
6.8	Dynamics of the action system: the Bernstein perspective . . . . .	205
6.9	Conclusions . . . . .	208
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>210</b>
<b>8</b>	<b>Conclusión</b>	<b>220</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>231</b>

---

# List of Figures

2.1	Schematic representation of the structure of the model. . . . .	82
2.2	Comparison of simulated and experimental IOR. . . . .	87
2.3	Mean RTs for experimental and simulated data . . . . .	88
2.4	Component-by-component overview of the functioning of the model.	90
2.5	Habituation curve. . . . .	92
2.6	Simulations without temporal expectation. . . . .	93
3.1	Scatter plots of frequency locking ratios ( $\rho$ ) by participant, session, ID <sub>left</sub> , and ID <sub>right</sub> . . . . .	111
3.2	Frequency locking ratios ( $\rho$ ) as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	112
3.3	MT as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	114
3.4	Relative MT as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	115
3.5	Regression surfaces for the bimanual Fitts' law. . . . .	119
3.6	H as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	121
3.7	Relative H as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	122
3.8	The flow parameter $\dot{\theta}_{min}$ as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> .	123
3.9	Relative $\dot{\theta}_{min}$ as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	123
3.10	The flow parameter $\dot{\theta}_{range}$ as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> .	125
3.11	The relative flow parameter $\dot{\theta}_{range}$ as a function of group, session, and ID <sub>diff</sub> . . . . .	125
3.12	Effects of ghost distance on oscillation frequency for varying $\omega$ . . .	128
3.13	Detailed view of experimental position and $\dot{\theta}$ series for a selected difficult trial. . . . .	129
3.14	Scatter plots of the estimated $\phi_{SD}$ for simulations with increasing coupling coefficient $\alpha$ . . . . .	131

---

3.15	Fit of a representative large asymmetry trial under weak coupling instructions. . . . .	133
3.16	Experimental and simulated $\dot{\theta}$ for both arms in a selected large asymmetry trial. . . . .	134
4.1	Example of a two-dimensional state space. . . . .	143
4.2	Illustration of the estimation of used informational variables. . . .	146
4.3	Predicted mean squared errors and directional errors by the use of different $x$ -loci . . . . .	148
4.4	Stimulus, response gauge and feedback of Experiment 1. . . . .	151
4.5	Predicted mean squared errors and directional errors for Experiment 2. . . . .	154
5.1	Representación esquemática de un planímetro polar. . . . .	170
5.2	Función de utilidad para el ejemplo de tacto dinámico. . . . .	183

---

# List of Tables

3.1	Summary of statistical analysis of main effects in repeated measures ANOVAs. . . . .	113
3.2	Summary of statistical analysis of interactions in repeated measures ANOVAs. . . . .	114
3.3	Bimanual Fitts' law: Results of non-linear regressions of MT onto $D_{\text{ipsi}}/W_{\text{ipsi}}$ and $D_{\text{contra}}/W_{\text{contra}}$ across sessions and groups. . . . .	118
4.1	Mean proportional absolute errors and $x$ -loci for Experiment 1 . .	152
4.2	Mean proportional absolute errors and $x$ -loci for Experiment 2 . .	156
4.3	Mean proportional absolute errors and $x$ -loci for Experiment 3 . .	160

---

# Capítulo 1

## Introducción General

La naturaleza tiene una capacidad ilimitada para sorprendernos. Resulta fascinante observar la destreza que muestra cada organismo para desenvolverse en su ambiente. Desde la escala molecular hasta la del organismo, múltiples procesos interconectados entran en escena en el momento, el lugar y la magnitud adecuadas, permitiendo la supervivencia del organismo en un entorno contingente y en perpetuo movimiento. Si alejamos nuestra perspectiva y observamos la biosfera en escalas espaciales y temporales más largas, como las territoriales o geológicas, una nueva oleada de procesos interconectados aparece ante nuestros ojos. En esta tesis, denomino adaptación a cada uno de estos procesos que confluyen en un organismo y contribuyen a su permanencia en el tiempo. La permanencia en el tiempo que implican las adaptaciones les dota de su carácter histórico, contingente e incommensurable. Sin embargo, las adaptaciones son también expresiones de la necesidad que todo organismo tiene de establecer un diálogo con su entorno. La hipótesis fundamental de la que parte esta investigación y que desarrollo a lo largo de este capítulo es que la formalización de esa dialéctica entre los sistemas vivos y sus entornos nos permite estudiar científicamente cada adaptación.

De entre la gran variedad de procesos y escalas adaptativas en la naturaleza, las relativas al denominado comportamiento cognitivo (o basado en conocimiento, o inteligente) serán el objeto de estudio en esta tesis. Estas adaptaciones orgánicas han estado tradicionalmente más próximas a las preocupaciones de teorías esencialistas sobre la naturaleza del hombre que al marco explicativo de la biología evolucionista. En esta tesis pretendo explorar las implicaciones para la psicología y la ingeniería de estudiar el comportamiento cognitivo dentro del marco más general de los procesos adaptativos en la biosfera. Desde mi perspectiva, esto equivale a preguntarse cómo se las han arreglado los organismos durante millones de años para abrirse paso a través de un entorno heterogéneo, dinámico e imprevisible. Explicar el comportamiento desde un marco adaptativo requiere que en las interacciones con el ambiente, además de contingencia y cambio perpetuo, también existan relaciones necesarias y patrones a los que el comportamiento del organismo puede adaptarse. En efecto, como veremos a lo largo de esta tesis, la existencia de patrones y de relaciones necesarias en el binomio organismo-ambiente hace posible el estudio científico las adaptaciones comportamentales.

En la actualidad, el debate sobre el comportamiento cognitivo se ha configurado en torno a un conjunto muy dispar de áreas de conocimiento: física, biología, psicología, filosofía, cibernética, análisis de sistemas complejos, teoría de autómatas, teoría de la información, por nombrar algunas de las más relevantes. En ocasiones, los planteamientos hechos desde algunas disciplinas dejan en un segundo plano la perspectiva del organismo en su ambiente, por lo que las respuestas que pueden ofrecer se alejan del foco de nuestro interés. Pese a esto, el complejo entramado de disciplinas y perspectivas ha dado lugar a conceptos transdisciplinarios y a aplicaciones mixtas de gran relevancia. El significado de algunas de estas propuestas resulta a menudo complicado de extraer debido a que muchas de sus premisas no son explícitas. Por esto, una perspectiva histórica de la discusión resulta esencial para comprender tanto las posiciones presentes en el debate, como la relevancia del debate mismo.

En la siguiente sección describo unas breves notas históricas acerca de la naturalización del estudio del comportamiento. A continuación, propongo un concepto de emergencia que pretende articular ese estudio naturalizado, así como una clasificación de los modos en que un sistema natural puede involucrarse dialécticamente con su entorno. Para adelantar, mi tesis es que el comportamiento cognitivo se sustenta en la capacidad de un sistema para establecer una dialéctica

informativa con su entorno, que se sustenta, a su vez, en el establecimiento de dialécticas disipativas y metabólicas coordinadas informativamente. A continuación considero los conceptos de la psicología ecológica para dar cuenta de las relaciones informativas que los organismos establecen con sus entornos. Para terminar, describo brevemente el contenido de los capítulos que forman esta tesis desde el marco teórico que los fundamentan y que he tratado de resumir en esta introducción.

## 1.1 Notas históricas sobre el estudio del comportamiento

El recorrido histórico que propongo para enmarcar la discusión en torno al comportamiento cognitivo comienza con las reflexiones de John Dewey sobre el concepto de arco reflejo en psicología, que presentan con claridad las ideas que articulan mi interpretación del comportamiento cognitivo: la naturaleza intrínsecamente significativa del dominio experiencial, el dualismo entre materia y significado que implican las interpretaciones mecanicistas de la cognición, y la posibilidad de una psicología materialista no reduccionista basada en el estudio de la relación entre materia y significado<sup>1</sup>. Como primer paso para fundamentar una psicología

---

<sup>1</sup>A lo largo de este capítulo utilizo el término significado sin hacer referencia explícita a una teoría de la significación. Para facilitar la comprensión de las ideas expuestas, refiero al lector al concepto triádico de relación de significación de Charles Sanders Peirce (véase Peirce, 1991, para una breve compilación de sus escritos sobre semiótica). Peirce afirma que en la relación de significación se establece una correspondencia entre el sistema de relaciones en que se incluye el objeto referido por el signo y el sistema de relaciones en que el signo muestra su eficacia operacional (donde el signo se interpreta en unos efectos). Por ejemplo, más adelante trataré la cuestión de la significación metabólica del entorno. En ese caso, el objeto del signo es una perturbación ambiental que afecta al sistema metabólico, el signo es la “codificación” de la perturbación ambiental en términos metabólicos (por ejemplo, si la perturbación es un aumento de temperatura, un signo de ese aumento de temperatura en el sistema metabólico será el cambio en la velocidad de las reacciones químicas) y, finalmente, el interpretante será el cambio adaptativo desencadenado por el aumento de temperatura en el entramado de procesos homeostáticos. En el estudio del desarrollo infantil temprano encontramos otro un ejemplo relevante del uso de la teoría pragmática triádica de Peirce (Rodríguez y Moro, 1998). Desde la perspectiva de las autoras, el niño se hace partícipe del mundo de significados culturales que le rodea a través del papel conductor de los adultos sobre las interacciones de los niños con el mundo de objetos. La historia de interacciones triádicas entre el niño, los adultos y los objetos pone a disposición del niño el repertorio cultural de posibilidades de acción sobre el mundo. De aquí el carácter pragmático y triádico de la semiótica que propone esta teoría: el *interpretans* del significado cultural de los objetos se encuentra en la red de interacciones (usos) sociales que éstos canalizan.

monista retomaré el concepto de sistema holístico regulatorio de la teoría general de los sistemas y la cibernética. Este concepto permite una descripción formal de la génesis de una perspectiva histórica desde la que se significa el entorno, condición necesaria para la existencia de adaptaciones. Las reflexiones de Conant y Ashby acerca de cómo debe ser un buen regulador evidencian la existencia de al menos dos grandes tipos de teorías de la regulación: las centrales y las distribuidas. Finalmente, para ilustrar el panorama actual en la modelización de procesos regulatorios consideraré el concepto más general de recursión, capaz de expresar nociones de regulación relevantes para la psicología a través de diversos formalismos: máquinas de Turing, autómatas celulares, redes neuronales, y dinámica no lineal.

### 1.1.1 John Dewey: El concepto de arco reflejo en psicología

Nuestro recorrido comienza con las reflexiones de John Dewey sobre el concepto de arco reflejo en psicología (Dewey, 1896/1990). El concepto de arco reflejo adquirió relevancia central en las explicaciones psicológicas a partir de la teoría dualista Cartesiana. El arco reflejo es la raíz misma de la organización y función del sistema nervioso. El concepto de arco reflejo denota el conjunto mínimo de estructuras orgánicas que entran en funcionamiento en la ejecución de un comportamiento. En los arcos reflejos más simples (como el patelar), tan solo una neurona sensorial, una neurona motora y un efector muscular son necesarios. De manera más general un arco reflejo se define como un trayecto a través del sistema neuromuscular que se compone de un recorrido aferente o sensorial, un recorrido intermedio o de procesado-planificación, y un recorrido eferente o de ejecución.

Dewey se pregunta si es razonable traspasar dicha imagen a la psicología, es decir, si tiene sentido organizar la investigación psicológica en torno a los componentes del arco reflejo: “En lugar de interpretar el carácter de la sensación, la idea y la acción a partir de su lugar y función en el circuito sensorio-motor, seguimos con la tendencia a interpretarlos en función de nuestras ideas preconcebidas y apriorísticas sobre las rígidas distinciones entre sensaciones, pensamientos y actos. [...] En consecuencia, el arco reflejo no es una unidad orgánica o global, sino un conjunto de partes demembradas, una conjunción mecánica de procesos inconexos.” (Dewey, 1896/1990, p. 198). Contra el mecanicismo dualista cartesiano encarnado en el arco reflejo, Dewey reclama una comprensión orgánica de la psicología, una donde los procesos fisiológicos se coordinan para cumplir con un



objetivo especificado psicológicamente.

Dewey se refiere a las coordinaciones sensorio-motoras teleológicas como acciones. La afirmación más radical de Dewey contra el uso del concepto de arco reflejo en psicología es que el estímulo primario para la acción no es una sensación, sino otra acción. Para ilustrar esta idea utiliza el conocido ejemplo de William James de un niño que quiere coger la llama de una vela. La interpretación ordinaria de esta situación a partir del concepto de arco reflejo sostiene que la luz de la vela es un estímulo para la respuesta de prensión, y la quemadura posterior es el estímulo para la respuesta de retirada. Sin embargo, según Dewey, la acción no se inicia con la estimulación óptica de la retina, sino con el acto de ver: el niño está activa y significativamente implicado en la acción de mirar, y no sólo recibiendo estímulos hasta que se desencadena una respuesta. En otras palabras, las acciones y sus metas sirven como contextos significativos dentro de los que se coordinan las sensaciones, los movimientos y sus mecanismos fisiológicos. Entonces, el acto de ver puede estimular un acto diferente, el acto de coger. En el acto de coger, las acciones de alcanzar y ver deben controlarse y estimularse mutuamente de forma que “nos hallamos ahora ante una coordinación ampliada y transformada; el acto, al igual que antes, es ver, pero ahora es ver-para-coger. Sigue habiendo un circuito senso-motor, una con más contenido o valor; no la sustitución por una respuesta motora de un estímulo sensorial.” (Dewey, 1896/1990, p. 199).

Dewey considera que la noción de arco reflejo es problemática porque asume que el estímulo sensorial y la respuesta motora son existencias psíquicas distintas. Sin embargo, en realidad están siempre dentro de una coordinación y tienen su significado únicamente desde el papel en el mantenimiento de dicha coordinación. En otras palabras, no tenemos la sustitución de un tipo de experiencia por otro, sino el desarrollo o la mediación de una misma experiencia. Por tanto, una psicología fundamentada en esta noción de arco reflejo está desarticulada porque rompe la continuidad significativa de la experiencia. Según Dewey, lo que queda es tan sólo una serie de sacudidas generadas fuera del proceso de la experiencia, ya sea en una presión ambiental, o en una inexplicable variación espontánea del alma. El proceso físico, en tanto que físico, es “la redistribución continua de masa en movimiento. Y desde una perspectiva descriptiva, el proceso no tiene nada que nos permita llamarlo reflejo. Se trata de pura y simple redistribución, lo mismo que la combustión de un leño, o la caída de una casa o el movimiento del viento. [...] Lo único que hay es un cambio en el sistema de tensiones.” (Dewey,

1896/1990, p. 203). Algo recíproco sucede cuando se describe el proceso desde el lado puramente psíquico, convirtiendo todo en sensación (qualia). La consistencia y materialidad de nuestra interacción con el entorno es reemplazada por un mundo de ideas y sensaciones desarraigado y solitario. Por tanto, Dewey concluirá que “la teoría del arco reflejo no es ni física (o fisiológica) ni psicológica; es una suposición mixta materialista-espiritualista” (Dewey, 1896/1990, p. 203).

En suma, Dewey presenta un rechazo frontal al dualismo que implica el concepto de arco reflejo en psicología. Los arcos reflejos son parte constitutiva de los procesos psicológicos, pero sólo en la medida en que disponen las condiciones para que se dé la coordinación sensorio-motora dentro del marco significativo de la acción. Una vez establecidas estas condiciones, el arco reflejo es incapaz de explicar los procesos psicológicos. Pensar de otro modo es escindir lo significativo de lo material en mundos irreconciliables que interactúan de maneras misteriosas. Sin embargo, lo neurofisiológico no tiene una significación psicológica intrínseca, es causa necesaria pero no suficiente del comportamiento cognitivo. Sus movimientos responden a su papel dentro de la coordinación que realiza acción: “La naturaleza concreta de la sensación en un momento dado dependerá totalmente del modo como se esté usando en una actividad. No tiene ninguna cualidad fija. La búsqueda del estímulo es la búsqueda de las condiciones exactas para la acción; esto es, la búsqueda de un estado de cosas que decida cómo hay que terminar una coordinación ya comenzada.” (Dewey, 1896/1990, p. 206). En la espiral de acciones de Dewey, su finalidad se convierte en causa eficiente del comportamiento.

### 1.1.2 Teoría sistémica y cibernética: Holismo en sistemas regulatorios

La psicología orgánica propuesta por Dewey plantea la cuestión de cómo hacer compatibles los niveles de explicación psicológico y fisiológico sin recurrir a fracturas ontológicas o a la disolución de uno en otro. A través de su interpretación de los actos como coordinaciones orgánicas en el plano de la experiencia, Dewey está rondando el escurridizo concepto de emergencia, que afanosamente ha luchado durante todo el siglo XX por convertirse en objeto de estudio científico (Corning, 2002; Ryan, 2007; Bedau y Humphreys, 2008). La interpretación holística del concepto de sistema supuso la primera aproximación formal a la noción de emergencia compatible con el materialismo, es decir, sin hacer uso de fuerzas vitales

o almas sobrenaturales. Este concepto fue propuesto desde las ciencias naturales por la teoría general de los sistemas de Ludwig von Bertalanffy (1949, 1950, 1968) y desde una perspectiva más próxima a la ingeniería por la cibernética de Norbert Wiener (1948) y William R. Ashby (1956).

Un sistema holístico hace referencia a un conjunto de elementos en interacción que forman una totalidad cuyo comportamiento no se puede deducir del comportamiento de sus partes, es decir, el todo es más que la suma de sus partes, del mismo modo que una acción no puede comprenderse únicamente a través de los componentes del arco reflejo. Por tanto, para comprender el funcionamiento de un sistema conviene describir cómo las interacciones entre los elementos determinan procesualmente el devenir del sistema, antes que estudiar exhaustivamente cada componente. Por esto se dice que los procesos son más relevantes que los estados para comprender la evolución de un sistema. Este énfasis de la sistémica y la cibernética en la dinámica de las interacciones y la irreducibilidad de la totalidad a las partes se plasma en su rechazo del reduccionismo y del mecanicismo, contraponiéndolos con el holismo y el organicismo.

Desde la perspectiva cibernético-sistémica, la emergencia de una totalidad en los sistemas holísticos se sustenta en su capacidad de regular sus interacciones con el entorno a través de algún tipo de relación causal circular. En otras palabras, los resultados de sus interacciones con el entorno son retro-alimentados al sistema (*feed-back*) para modificar esas interacciones respecto del estado de equilibrio dinámico que activamente persiguen los procesos regulatorios del sistema. Esta demarcación tan general abarca todos los sistemas vivos, algunos sistemas físico-químicos y los más sofisticados sistemas artificiales. El concepto de sistema holístico regulatorio permite una noción de teleología compatible con el mecanicismo basada en la tendencia del sistema a volver al estado de equilibrio dinámico fijado por los procesos regulatorios del sistema (von Bertalanffy, 1968; Ashby, 1956). Así, la conservación homeostática de la unidad sistémica se convierte en causa eficiente de los cambios del sistema. Este concepto de regulación sistémica implica una perspectiva desde la que el entorno se significa para el sistema en función de sus efectos sobre los procesos de homeostasis que lo sustentan.

El abstracto formalismo cibernético-sistémico es capaz de expresar conceptos de regulación diametralmente opuestos. En un polo del continuo se encuentra la perspectiva organísmica de la sistémica y parte de la cibernética, y en el otro la perspectiva del diseñador de máquinas de otra parte de la cibernética. El tipo

de teoría de la regulación que implica la perspectiva del diseñador inteligente se plasma con claridad en el trabajo de Conant y Ashby (1970) acerca del buen regulador, donde demuestran el teorema de que todo buen regulador de un sistema ha de ser un modelo del sistema. Conant y Ashby concluyen que el regulador debe ser un mapeo isomorfo al sistema, por lo que recomiendan que el primer paso para diseñar sistemas regulatorios complejos sea construir un modelo del sistema. Evidentemente, este modelo del sistema es explícito e inteligible para el diseñador, por lo que el regulador y lo regulado son conjuntos disjuntos. Sin embargo, una de las pocas premisas que han de suponer en su planteamiento deductivo es la separación entre regulador y regulado. Desde el punto de vista del ingeniero esta suposición puede estar justificada, pero su aplicación al estudio de sistemas vivos plantea muchas dudas.

El esquema de regulación exógena centralizada que nos ofrece este tipo de cibernética revive los fantasmas de la respuesta, el estímulo y el pensamiento de Dewey. Del mismo modo que el concepto de arco reflejo en psicología asigna propiedades relacionales de la unidad sistémica a sus componentes, un regulador central es (en el mejor de los casos) un subconjunto del sistema al que se le asignan propiedades relacionales de la unidad sistémica. Un regulador central modela explícitamente el sistema, el entorno y sus interacciones recíprocas. Sin embargo, el significado del modelo necesita y está definido en función del diseñador, del mismo modo que el esquema estímulo-respuesta requiere de causas externas al sistema. En otras palabras, un regulador central explícito impone una finalidad extrínseca al sistema, pues dicha finalidad no se genera desde la red de interacciones que conforman el sistema, sino desde los propósitos del diseñador del modelo que son impuestos sobre el sistema.

El mismo esquema de regulación central inspira la teoría de los *sistemas de símbolos físicos* de Herbert A. Simon (1962, 1969/1996), una de las propuestas teóricas más influyentes en el desarrollo del cognitivismo y la inteligencia artificial. Simon utiliza el término genérico de artefacto para referirse a cualquier sistema que actúa como un interfaz entre la complejidad interna del sistema y la complejidad del entorno del sistema. Así, los sistemas artefactuales o artificiales se caracterizan por un comportamiento que no está determinado por el dictado de las leyes naturales: “La tesis es que ciertos fenómenos son *artificiales* en un sentido muy específico: son como son sólo porque un sistema es moldeado al ambi-

ente en que vive por objetivos y propósitos.” (Simon, 1969/1996, p. xi)<sup>2</sup>. En línea con el concepto de regulación central, Simon propone que para estudiar dichos sistemas artificiales es necesario centrarse en su organización (la formalización de las relaciones entre los componentes del sistema y de éstos con el entorno) y no en su composición física. Es por esto que los computadores pueden ser buenos dispositivos para estudiar las consecuencias de distintas organizaciones para el comportamiento humano (Simon, 1969/1996).

Para Simon, los artefactos son dispositivos regidos por leyes simples, y es sólo a través de su confrontación con un entorno complejo que el comportamiento de un artefacto se torna igualmente complejo: “A medida que ampliamos nuestro conocimiento acerca de los computadores, descubrimos que, en gran medida, su comportamiento está gobernado por reglas generales simples, y que lo que aparenta ser complejidad en el programa computado, no es sino la complejidad del entorno al que el programa estaba pretendiendo adaptar su comportamiento.” (Simon, 1969/1996, p. 21). Lo que, aplicado al estudio del comportamiento humano, se traduce para Simon en que: “La gente, o al menos su componente intelectual, pueden ser relativamente simples, pues la mayor parte de la complejidad de su comportamiento proviene de su entorno, de la búsqueda de buenos diseños.” (Simon, 1969/1996, p. 138). En suma, avanzando el planteamiento de la regulación central propuesta por Ashby, Simon plantea que dicha regulación no es sino el producto de la operación de un sistema de símbolos que actúa como interfaz entre los ambientes interno y externo del artefacto. Así, Simon añade al regulador central el que su modelo explícito del sistema a regular ha de ser simbólico porque actúa como un interfaz artificial. Por tanto, para comprender el comportamiento de un sistema regulatorio tenemos que analizarlo como un interfaz simbólico artificial que regula el acoplamiento entre el sistema y su entorno. Esta versión del argumento de Simon resume con claridad el programa de investigación perseguido por el cognitivismo y la inteligencia artificial.

Simon, que se declara reduccionista por principio pero pragmáticamente holista, fundamenta su teoría de los sistemas de símbolos físicos en una arquitectura de los sistemas complejos estructuralmente jerárquica que requiere su cuasi descomposicionalidad, es decir, la posibilidad teórica de reducir la función del interfaz simbólico a procesos estructurales jerárquicamente inferiores (Simon, 1962). Como

---

<sup>2</sup>Todas las traducciones de citas textuales que aparecen en lo que resta de este capítulo han sido realizadas por mi directamente desde el texto original en inglés debido a la falta de textos alternativos en castellano.

explicaré más adelante, esta suposición reduccionista fue discutida enérgicamente desde el holismo de la sistémica y la cibernética. Por ahora, baste con recordar las reflexiones de von Neumann (cf. Shaw, 2003) para comprender que Simon podría estar cometiendo un error al juzgar a los organismos como sistemas con interiores simples y reducibles a procesos estructurales que tan solo se complican cuando se enfrentan simbólicamente a su entorno:

La lógica formal indica que la descripción de las funciones de un autómata es más simple que el autómata mismo, siempre y cuando el autómata no sea muy complicado, pero para autómatas con complicaciones altas, el objeto es más simple que su descripción literal. (von Neumann, 1949/1966, p. 47).

Muy oportunamente, Gödel consideró que von Neumann se estaba refiriendo a su trabajo cuando formuló esta conjetura:

Creo que el teorema a que se refiere von Neumann no es la existencia de proposiciones indecidibles o al de la longitud de las demostraciones, sino al hecho de que una descripción epistemológicamente completa de un lenguaje A no puede darse en el mismo lenguaje A, porque el concepto de verdad de las sentencias de A no puede ser definido en A. [...] Este teorema muestra que la descripción de qué está haciendo un mecanismo en ciertos casos es más compleja que la descripción del mecanismo, en el sentido de que requiere términos nuevos y más abstractos. (Citado en von Neumann, 1949/1966, pp. 55-56).

Un regulador central y simbólico se basa en una descripción formal de una serie de componentes y de operaciones entre componentes que reducen el proceso de regulación sistémico a sus mecanismos estructurales. Von Neumann y Gödel sugieren que formalizar estructuralmente los procesos de regulación de sistemas complejos es un planteamiento condenado a fallar.

Una vez formalizado el mecanismo simbólico que supuestamente opera en un proceso regulatorio, las funciones regulatorias que dicho mecanismo desempeña dentro de un sistema complejo en interacción con su entorno no se pueden conocer desde dentro del formalismo del mecanismo. El sistema complejo está implicado con su entorno de manera directa, por medio de interacciones que no existen en el nivel de descripción mecanístico, y que por tanto no se pueden obtener de la operación recursiva del mecanismo. Se requiere un nuevo lenguaje, un metalenguaje

del formalismo del mecanismo con términos nuevos y más abstractos en los que poder describir la dimensión funcional emergente (von Neumann, 1949/1966), la de los modos de interacción ambiental establecidos por el sistema. Así, el metalenguaje es un formalismo cuyos terminales están definidos en el nivel de análisis de la totalidad. En este formalismo los procesos estructurales pueden ser entendidos respecto de su papel en la coordinación realizada por la totalidad para cumplir con objetivos definidos en el nivel holístico o metalingüístico, y donde podemos definir el “valor de verdad” de la interpretación funcional de los mecanismos que los realizan.

Por tanto, la alternativa al regulador central consiste en identificar el regulador con lo regulado, es decir, en distribuir la responsabilidad de la regulación a lo largo de todo el sistema y no privilegiar un determinado componente. La regulación es una propiedad holística que opera respecto de objetivos definidos por la totalidad, y no por sus mecanismos. El papel de los mecanismos en el proceso de regulación es establecer el espacio de posibilidades en el que la regulación sistémica puede tener lugar, es decir, establecen restricciones a las posibilidades funcionales del sistema pero no determinan su evolución. Las múltiples escalas de un sistema complejo están organizadas y entrelazadas de tal forma que el sistema es capaz de autorregular su acoplamiento al entorno, de establecer su propio dominio de regulación sin requerir de sistemas de significación externos a lo regulado (los modelos del ingeniero). Esta autorregulación se expresa a lo largo de las escalas de organización anidadas en el sistema como distintas compatibilidades en la coalición sistema-entorno.

En suma, la regulación distribuida de los sistemas complejos requiere una teoría capaz de dar cuenta de la mutua dependencia entre los niveles de organización del sistema (Anderson, 1972; Barabási, 2002; Brooks, 1991; Effken y Shaw, 1992; Soodak y Iberall, 1978; von Bertalanffy, 1949). Una teoría de la adaptación biológica como la reclamada no rechaza la utilidad de los formalismos. Contra lo que sí debe advertirnos es contra la posibilidad de definir un formalismo único para gobernar todos los niveles funcionales del sistema, no sólo por la dificultad práctica para definirlo y manipularlo, sino por su imposibilidad e incorrección teórica. Como veremos más adelante, el tipo de teoría regulatoria necesaria es diametralmente opuesta a la teoría estructural descomposicional de Simon.

En la sección que sigue presento cuatro célebres formalismos para ilustrar esta abstracta discusión sobre los modelos científicos de los procesos regulatorios.

Estos formalismos tienen en común su participación de la noción de recursión y su utilidad para formalizar procesos regulatorios de muy distinta índole. Por su diseño, cada uno ha sido preferentemente utilizado para implementar unos u otros modelos de regulación. Sin embargo, todos estos formalismos tienen una capacidad de cómputo universal, por lo que el criterio definitivo para saber qué tipo de regulación se está implementando no reside en el formalismo en sí mismo, sino en las suposiciones adicionales acerca del objeto de estudio que necesariamente trae consigo el investigador.

### 1.1.3 Formalismos recursivos para los procesos regulatorios

El programa de investigación que desarrolló los conceptos de recursión y computabilidad a partir de la lógica matemática tiene gran interés para comprender las propuestas actuales sobre la regulación del comportamiento. El concepto de recursión es útil para expresar formalmente una de las intuiciones más importantes para comprender los sistemas regulatorios: la autoafirmación sostenida en el tiempo del sistema a través de sus modos de interactuar (Ashby, 1956; von Bertalanffy, 1949). Así, un proceso de regulación puede formalizarse como la operación recursiva de una serie de reglas de transformación sobre unos terminales de tal forma que constituyen el sistema mismo en el proceso. En este sentido, un sistema regulatorio se distingue de su entorno porque su evolución no está dictada por el segundo principio de la termodinámica o por las leyes mecánicas de conservación de la energía. Al contrario, su evolución frente a una perturbación está determinada por sus procesos regulatorios o, desde el punto de vista de los formalismos recursivos, por las reglas de cambio del proceso de recursión. A continuación expongo cuatro procedimientos recursivos muy relevantes en el estudio de los sistemas regulatorios, así como los conjuntos de problemas donde se han aplicado preferente, y el tipo de recursión que implementan.

### Máquinas de Turing

En su búsqueda de una fundamentación sólida para la matemática, David Hilbert planteó a la comunidad científica el problema de si existe un algoritmo (es decir, un método automático sin la ayuda del conocimiento humano o la intuición) que pueda probar o refutar la validez universal de cualquier proposición matemática expresable a través de una lógica axiomática (Garrido, 1974). Las implicaciones



de la pregunta de Hilbert son de largo alcance para la ciencia y la tecnología. Hilbert estaba proponiendo si es posible la generación automática de todo el conocimiento deductivo que se puede obtener de un sistema axiomático recursivo. Ya en la época existían sistemas axiomáticos más o menos completos para la geometría, la teoría de conjuntos, la aritmética y distintas áreas de la física. Si la pregunta de Hilbert encontraba respuesta, automáticamente encontrarían respuesta todas las preguntas científicas *formulables* en las distintas áreas de conocimiento axiomatizadas.

Responder al problema de la decisión de Hilbert requería formalizar el concepto de algoritmo. Para ello, Alan Turing y Alonzo Church desarrollaron de manera independiente una teoría recursiva de la computabilidad donde concluían, en línea con los resultados de Kurt Gödel publicados años antes, que dado un input al algoritmo (un cierto teorema geométrico a demostrar a partir de los axiomas del sistema, por ejemplo) no podría saberse a priori si un algoritmo como el que requería la pregunta de Hilbert terminaría sus cálculos en algún momento o si permanecería eternamente en una recursión sin fin (Nagel y Newman, 1994). Pese a estas devastadoras demostraciones de la limitación epistemológica intrínseca a todo sistema formal, la lógica simbólica evolucionó en pocos años hacia una teoría de motores lógicos realizables gracias a los sistemas axiomáticos recursivos y a las nuevas técnicas electromecánicas y electrónicas para construir autómatas. Estas máquinas de cómputo aplican de forma recursiva los axiomas o reglas de transformación del sistema formal a los terminales o fórmulas lógicas. El primero y más célebre de estos motores lógicos fue la mencionada máquina universal de Turing, un dispositivo ideal capaz de computar cualquier algoritmo expresable en el lenguaje de la máquina (Turing, 1950). Lo peculiar de la máquina de Turing para mi discusión es que su concepto de recursión discretiza y convencionaliza el tiempo, definiéndolo de manera indirecta como la mera sucesión de pasos del algoritmo. Igualmente, la máquina de Turing elimina por completo la dimensión espacial de la recursión.

La recursión que caracteriza a la máquina universal de Turing está muy relacionada con las teorías proposicionales del conocimiento (Nagel y Newman, 1994). Así, las simplificaciones de la máquina de Turing le acercan al modo de recursión que, según las teorías proposicionales del conocimiento, caracterizan nuestros discursos internos y externos: una única sucesión lineal de estados discretos convencionales que no requieren ni de un espacio explícito ni de un soporte material

concreto para su existencia (Chomsky, 1965; Fodor, 1975; Simon, 1962, 1980). En otras palabras, si suponemos que el comportamiento cognitivo es convencional, monolítico, secuencial e inextenso, la máquina de Turing se presenta como el mejor candidato para describir los procesos de regulación que lo producen. En consecuencia, éste ha sido el formalismo predilecto de las aproximaciones computacionalistas y representacionalistas al comportamiento cognitivo, tales como la psicología cognitiva (Neisser, 1967; Newell y Simon, 1976; Simon, 1980) y la inteligencia artificial (Minsky, 1961; Simon, 1969/1996), en las que la célebre metáfora del computador subyace como el modelo de regulación central, convencional, disjunta y explícita que caracteriza el comportamiento de un sistema.

En suma, la máquina de Turing es el formalismo recursivo que mejor captura las propiedades de la metáfora de los sistemas de símbolos físicos que Simon propuso como modelo para las ciencias de “lo artificial” (Newell y Simon, 1976; Simon, 1980). No en vano, la metáfora del computador actualmente domina no sólo la investigación en psicología y neurociencias, sino también la percepción más extendida en la sociedad acerca del funcionamiento de nuestro comportamiento.

### **Autómatas celulares**

Una de las figuras esenciales de la revolución tecnológica y científica iniciada por las máquinas de Turing fue John von Neumann. Ésa fue también una época de intensa investigación acerca del papel de los ácidos nucleicos en la transmisión de la herencia biológica, un problema que fascinó a von Neumann. Una de sus aportaciones más relevantes a la discusión consistió en la formalización del proceso de autorreplicación por medio de autómatas recursivos análogos a los de Turing. Sin embargo, los autómatas que ideó von Neumann no se caracterizan por su capacidad de computación universal, sino por su capacidad de contrucción universal (von Neumann, 1949/1966). Así, frente a los autómatas de Turing y los reguladores centrales de la cibernética -cuyos productos son distintos tanto del automatismo que regula como del sistema por él regulado-, von Neumann se planteó diseñar un autómata cuyo producto fuese el autómata mismo. Estos autómatas constructores universales toman como entrada la descripción formal de un autómata (o, más bien, de la descripción formal de cómo construir un autómata), y generan como salida una copia exacta del autómata (incluyendo la descripción del automata) a partir de bloques de construcción que se encuentran disponibles en el medio. Si la descripción que recibe el autómata es la suya propia, entonces

actuará como un sistema autorreplicante.

Este modelo inició la investigación en los llamados autómatas celulares, que generalizan el autorreplicante de von Neumann manteniendo la espacialidad de los estados y el concepto de vecindad sobre la que se definen las reglas de transición (Wolfram, 1982). El formalismo recursivo de los autómatas celulares consiste en una colectividad de máquinas de Turing cuyos estados evolucionan en función de propiedades locales de su entorno (los estados de una cierta vecindad). Así, los autómatas celulares se definen en un espacio que forma parte constitutiva de sus reglas de transición. En un autómata celular pueden aparecer complejas dinámicas globales como resultado de las interacciones locales entre los autómatas. Del mismo modo que la máquina de Turing, los autómatas celulares discretizan y convencionalizan la temporalidad de los procesos. Sin embargo, a pesar de su temporalidad discreta, es sencillo diseñar autómatas que produzcan patrones que se extienden a lo largo de múltiples escalas temporales. Igualmente, la consideración explícita de una dimensión espacial en el proceso de recursión abre la posibilidad de describir procesos que se verifican a múltiples escalas espaciales simultáneamente. Por esto, los autómatas celulares son formalismos adecuados para el estudio de procesos regulatorios distribuidos en sistemas complejos desde una perspectiva estructural (Varela, Maturana y Uribe, 1974). En la actualidad, los autómatas celulares son herramientas muy útiles en el análisis de sistemas complejos para estudiar fenómenos característicos como transiciones de fase, catástrofes, caos o autosimilaridad fractal (Wolfram, 1985).

### **Redes neuronales artificiales**

Este formalismo recursivo fue propuesto por McCulloch y Pitts (1943). Las redes neuronales artificiales (RNA) pueden considerarse una extensión de los autómatas celulares en la que se añade la posibilidad de interacciones a larga distancia con un número arbitrario de nodos, y de reglas transición mixtas, es decir, analógicas (emulando la aditividad de los potenciales dendríticos electrotónicos) y digitales (emulando la transmisión *todo-o-nada* de los potenciales de acción). Estas características adicionales convierten a las RNA en un modelo mucho más cercano a las propiedades de las “unidades de cómputo” del sistema nervioso. Podemos distinguir dos grandes grupos dentro de las RNA en función del tratamiento que dan a la dimensión temporal de la computación. Por un lado, los modelos conexionistas, al igual que los autómatas celulares, definen una dimensión temporal

convencional (y, en muchas ocasiones, espacialmente convencional también), simplificando su diseño, optimización y análisis. Por otro lado, los modelos de RNA biofísicamente realistas añaden una dimensión temporal continua (y, en ocasiones, espacialmente continua también), constitutiva de las reglas de transición del sistema. Al igual que los autómatas celulares, las redes conexionistas y las redes biofísicamente realistas son formalismos estructurales, que describen el comportamiento del sistema a partir de las interacciones entre componentes definidos en una escala más pequeña que la del sistema.

El modelo de regulación que implementa la estructura de una RNA está determinado por las premisas de la investigación y no por el formalismo en sí mismo. Así pues, no es raro encontrar en modelos conexionistas tanto regulaciones que contienen modelos explícitos o cuasi-explícitos del proceso a controlar (Smolensky, 1990), como regulaciones distribuidas en sistemas holísticos donde no es posible encontrar una transformación del sistema tal que recuperemos las representaciones explícitas de sus estados (Hopfield, 1982). Igualmente, muchas de las redes biofísicamente realistas implementan regulaciones centrales con modelos explícitos (Anderson, Matessa y Lebiere, 1997), aunque no faltan los ejemplos de regulaciones distribuidas con modelos implícitos (Erlhagen y Schöner, 2002). El trabajo que presento en el Capítulo 2 hace uso de una RNA biofísicamente realista que participa en la regulación distribuida del comportamiento en una tarea de orientación espacial. En este caso, la red fue implementada por medio de sistemas dinámicos ya que, como defenderé a continuación, es el formalismo que más simplifica la tarea de diseñar un modelo que describa las interacciones de un sistema a distintas escalas.

## Dinámica de sistemas no-lineales

La dinámica no-lineal es el formalismo empleado por la sistémica y la cibernética para describir los sistemas holísticos. Su origen se encuentra en la dinámica de Newton, que describe los sistemas mecánicos a partir de leyes de cambio diferenciales de las variables de estado dinámicas y cinemáticas del sistema. La imposibilidad de resolver el problema de los tres cuerpos de la mecánica puso en evidencia la necesidad de una metodología distinta para estudiar sistemas con más de dos elementos en interacción recíproca. Este problema permaneció 200 años sin solución, hasta que la intuición topológica de Henri Poincaré permitió reformular el problema en unos términos radicalmente distintos. Su brillante idea

consistió en no buscar la solución analítica exacta para los estados futuros del sistema, que era imposible en la práctica, y concentrarse en estudiar las leyes de cambio del sistema para determinar su estabilidad local y global a largo plazo frente a perturbaciones. Poincaré demostró que la forma espacial delimitada por las leyes de cambio del sistema (la topología de su espacio de fases), puede proporcionarnos mucha información sobre las propiedades y el comportamiento de las soluciones.

Las reglas de cambio de un sistema dinámico son ecuaciones diferenciales si las variables de estado del sistema evolucionan de manera continua en el tiempo, y ecuaciones en diferencias si lo hacen de manera discreta o episódica. Haciendo uso de los sistemas dinámicos podemos implementar con relativa facilidad cualquier modelo recursivo de regulación. Regulaciones centrales o distribuidas pueden modelarse eligiendo el sistema de ecuaciones adecuado. La naturaleza espacial o no de las variables de estado únicamente supone añadir una nueva dimensión al modelo, del mismo modo que emplear una dimensión temporal discreta o continua únicamente supondría elegir entre ecuaciones diferenciales o en diferencias. Igualmente, los procesos modelados pueden ser deterministas o incluir dinámicas estocásticas. De manera muy relevante para el estudio de los sistemas complejos autorregulados, las variables de estado del sistema pueden representar cualquier magnitud cuantificable definida al nivel de análisis que interese al investigador. Por esto, el campo de aplicación de los sistemas dinámicos se ha extendido a todas las áreas de la ciencia (en parte gracias al impulso de la sistémica y la cibernética), siendo el formalismo por excelencia para describir la evolución de sistemas interactivos.

Este formalismo ha tenido un gran impacto en psicología y neurofisiología porque permite usar un mismo lenguaje recursivo para abordar procesos regulatorios que se verifican en distintos niveles de análisis. Gracias a esto, una nueva aproximación a la investigación en psicología denominada dinamicismo se ha abierto paso en el panorama académico desde los años 80 (Kelso, 1995; Kugler y Turvey, 1989; Port y van Gelder, 1995; Richardson, Shockley, Riley, Fajen y Turvey, 2008; Thelen y Smith, 1994; Turvey, Shaw y Mace, 1978; ). El dinamicismo en particular, y los sistemas dinámicos en general, abren nuevas perspectivas en el debate acerca de los niveles de organización y análisis que expondré con más detalle en la siguiente sección. Los sistemas dinámicos permiten estudiar los fenómenos de adaptación comportamental como el producto de la interacción de múltiples

procesos que se verifican a lo largo de distintas escalas espacio-temporales (Erlhaguen y Schöner, 2002; Kelty-Stephen, Palatinus, Saltzman y Dixon, 2013; van Orden, Moreno y Holden, 2003). El lenguaje unificador de los sistemas dinámicos facilita la descripción parsimoniosa de la integración entre niveles de análisis anidados. Por ejemplo, si empleamos una dimensión espacial común a todas las variables dinámicas modeladas, la semántica de la dimensión espacial es diferente para cada nivel de análisis, pero el modelo es capaz de captar la continuidad de las relaciones métricas en las interacciones entre niveles y entre elementos.

Los trabajos experimentales que presento en esta tesis emplean distintos modelos dinámicos para estudiar comportamientos adaptativos a distintas escalas de análisis: en el Capítulo 2, empleo una RNA continua biofísicamente realista (DFT, dynamic field theory) para estudiar un proceso que clásicamente ha sido entendido como producto de una criticada dinámica intrínseca del foco atencional como un proceso de integración sensorio-motora; en el Capítulo 3, utilizo un modelo de osciladores no lineales acoplados para estudiar la adaptación y el aprendizaje en la dinámica comportamental en una tarea de coordinación bimanual bajo restricciones de precisión, y en el Capítulo 4, un modelo dinámico definido sobre espacios informacionales me permite comparar teorías de aprendizaje perceptivo. Antes, presento a continuación un concepto de emergencia que estructura la perspectiva de la regulación comportamental que fundamenta las distintas investigaciones realizadas en mi tesis.

## 1.2 Una perspectiva unificadora de las escalas de adaptación

El estudio científico del comportamiento cognitivo de los organismos desde el paradigma de la adaptación biológica pasa, necesariamente, por considerarlo como un proceso de co-adaptación con su entorno que se verifica a lo largo de todas sus escalas o niveles (Anderson, 1973; Iberall y McCulloch, 1969; Levins y Lewontin, 1985; Polanyi, 1968; Port y van Gelder, 1995; Schneirla, 1966; Simon, 1962; Thelen y Smith, 1994; van Orden, Moreno y Holden, 2003; von Bertalanffy, 1949). El primer intento moderno de dar una explicación científica integradora y sistematizadora de los niveles de organización fue de von Bertalanffy (1949). Sin embargo, la teoría de la jerarquía estructural de Simon (1962) tuvo mucho mayor impacto en los futuros desarrollos de este concepto dentro del ámbito de

la psicología y las ciencias del comportamiento. Por esto, comenzaré explicando la teoría de la complejidad de Simon para presentar la posición mayoritaria de la comunidad científica en las discusiones en torno a la complejidad, así como para evidenciar sus carencias fundamentales.

### 1.2.1 La jerarquía estructural de Simon y el concepto epistemológico de emergencia

Parte del éxito de la teoría de Simon reside en su propuesta epistemológica reduccionista encarnada en el principio de cuasi-descomposicionalidad de los sistemas complejos. Según este principio, los sistemas complejos están compuestos por estructuras jerárquicas anidadas, sistemas dentro de sistemas, verticalmente separados en el tiempo. Esta separación vertical significa que los sistemas más elevados en la jerarquía cambian sus estados en escalas temporales más largas que los sistemas más abajo en la jerarquía, por lo que sus evoluciones pueden considerarse independientes. Así, el buen funcionamiento de los sistemas complejos requiere una adecuada disposición estructural donde los procesos de un nivel jerárquico se combinan aditivamente generando un funcionamiento apropiado a los requerimientos de los niveles contiguos en la jerarquía. En otras palabras, cada nivel realiza un mapeo entre sus estados de entrada y de salida tal que es apropiado para los requerimientos funcionales de los mapeos que se realizan en niveles superiores, y compatible con las restricciones que imponen los niveles inferiores.

Simon interpreta la evolución y la adaptación de los sistemas complejos como procesos de selección de mapeos adecuados a la función que debe desempeñar el autómata en el entorno. Para Simon, el proceso de selección de los mapeos adecuados puede realizarse independientemente en cada nivel debido al casi perfecto aislamiento de la jerarquía estructural. El holismo pragmático (o reduccionismo modesto) de que hacía gala Simon se basa en su consideración de que los niveles de la jerarquía son meramente instrumentos metodológicos para condensar la relevancia de los mapeos del nivel elemental del sistema en escalas temporales más largas. Son epistemológicamente útiles en la medida en que una descripción totalmente reduccionista de los múltiples mapeos es imposible en la práctica, aunque nada lo impida en teoría. Las elocuentes palabras con las que Ashby presenta la nueva ciencia de la complejidad evidencian con claridad la distancia de la propuesta de Simon con los fenómenos naturales:

La Ciencia está hoy en una especie de línea divisoria. Durante dos siglos ha explorado sistemas que son intrínsecamente simples o analizables en componentes simples. El hecho de que el dogma de variar los factores de uno en uno pudiera ser aceptado durante un siglo, muestra que los científicos estuvieron preocupados en gran medida en la investigación del tipo de sistemas permitidos por este método; ya que este método es fundamentalmente imposible de aplicar a los sistemas complejos. No fue sino hasta la obra de Sir Ronald Fisher en los años 20, con los experimentos llevados a cabo en los suelos agrícolas, que llegó a ser claramente reconocido que hay sistemas complejos que simplemente no permiten la variación de un solo factor a la vez: son tan dinámicos e interconectados que la alteración de un factor de inmediato actúa como causa para evocar alteraciones en otros factores, tal vez en un gran número de ellos. (Ashby, 1956, p. 5).

Para Ashby, comprender las adaptaciones comportamentales de los organismos requiere una perspectiva de la complejidad más profunda que la modularidad reduccionista de Simon. Esta perspectiva debe considerar el comportamiento de los sistemas complejos autorregulados como el producto del acoplamiento vertical de procesos dinámicos en distintas escalas temporales, y reconocer tanto el contenido irreducible como las características generales de las adaptaciones en cada nivel de organización (Anderson, 1972; Barabási, 2002; Iberall y McCulloch, 1968; Pattee, 1972, 1982; Polanyi, 1968; Soodak y Iberall, 1978; Turvey et al., 1978; van Orden et al., 2003). Con esta doble finalidad, considero a continuación el concepto de emergencia desde la perspectiva del colectivo, y la emergencia ambiental como el tipo de emergencia más apropiado para la complejidad biológica. Tomando como punto de partida que todo sistema complejo *natural* es el resultado de procesos de emergencia ambiental, propongo una clasificación de los sistemas complejos autoorganizados en función del modo específico en que se implican con su entorno. Desde esta clasificación podemos entender mejor el lugar de las adaptaciones comportamentales en la autorregulación distribuida de los organismos, así como sus propiedades y procesos constitutivos.



### 1.2.2 La perspectiva del colectivo y el concepto ontológico de emergencia

Los primeros intentos de explicar el concepto de emergencia partían de la noción de una jerarquía de niveles de emergencia (para una revisión histórica del concepto de emergencia, ver Bedau y Humphreys, 2008; Corning, 2002; y, más brevemente, en Ryan, 2007). Sin embargo, el uso de una jerarquía de emergencias para dar cuenta de las propiedades emergentes es peligrosamente circular, dado que los niveles se definen por la existencia de propiedades emergentes que los caracterizan (Ryan, 2007). Para eludir esta circularidad, el concepto de nivel de organización no puede emplearse para definir emergencia. Siguiendo a Ryan, una aproximación alternativa para caracterizar el concepto de emergencia puede realizarse mediante las nociones epistémicas de ámbito (*scope*) y resolución (*resolution*) de una descripción. Con estos conceptos podemos desarrollar una epistemología sensible al anidamiento funcional constitutivo de los sistemas regulatorios distribuidos, que nos permita acceder científicamente al concepto ontológico de escala (sustituto del concepto de nivel de organización en las aproximaciones clásicas).

Esta epistemología parte de la denominada perspectiva del colectivo (*ensemble perspective*) de la física estadística. En esta aproximación, un sistema consiste en un gran número de componentes, cada uno de los cuales tiene un conjunto de estados accesibles. Cada combinación de los estados de los componentes del sistema forma un microestado, por lo que el número de microestados accesible a un sistema crece astronómicamente con el número de los componentes del sistema y el número de estados en los que puede estar cada componente. Desde la perspectiva del colectivo, un macroestado del sistema se corresponde con un conjunto de configuraciones de microestados para los que una cierta propiedad colectiva (emergente) tiene el mismo valor. Por ejemplo, la temperatura de un gas en un sistema cerrado es el valor de una propiedad macroscópica colectiva. Cada temperatura del gas se corresponde con un conjunto de configuraciones de microestados, es decir, todas las configuraciones distintas de las moléculas de gas (todos los conjuntos de posiciones y velocidades moleculares) que mantienen invariante la temperatura global del sistema.

En la propuesta de Ryan (2007), el ámbito o alcance de una descripción está definido por una frontera espacial en el sentido más amplio de la palabra, incluyendo tanto espacios conceptuales como espacios físicos. El ámbito o alcance de la descripción de un sistema es el conjunto de componentes dentro de la frontera

entre el sistema y su entorno, por lo que equivale a la operación epistemológica de demarcación en la teoría general de los sistemas (von Bertalanffy, 1968). Si un observador pasa de describir el sistema a describir uno de sus componentes, el ámbito de la descripción se habrá reducido. También hay una dimensión temporal del ámbito, que define el intervalo de tiempo durante el que la descripción del sistema es efectiva. La resolución de una descripción se define como la distinción espacial o temporal más fina entre dos microestados alternativos. Para dos descripciones con distinta resolución pero mismo ámbito, la resolución más fina (alta) puede distinguir un mayor número de posibilidades y por lo tanto cada estado contiene más información. El escalado de un proceso hace referencia a su transformación por multiplicación o amplificación. La escala de un proceso es independiente de su descripción, es una cualidad del proceso. A medida que un proceso aumenta de escala, puede ser detectado a resoluciones más gruesas. En este sentido decimos que la escala es un concepto ontológico y que la resolución y el ámbito son conceptos epistemológicos. En adelante, utilizaré el término escala con este sentido ontológico espacio-temporal cuando me refiera a procesos, y con un sentido epistemológico cuando me refiera a escalas de análisis. Volvamos por un momento a los conceptos de emergencia de Simon y Ashby para comprenderlos desde el marco epistemológico que acabo de introducir.

Para Simon, el concepto de emergencia es simplemente una ayuda heurística, con valor epistemológico pero sin implicaciones ontológicas. Las propiedades emergentes son útiles para el científico porque representan parsimoniosamente complejos sistemas mecánicos, pero no se refieren a nada que realmente emerja. Este tipo de emergencia débil caracteriza a los sistemas reducibles (Bedau, 1997; Bar-Yam, 2004), formados por componentes que interactúan aditivamente en un medio pasivo y que, por tanto, cumplen el principio de cuasi-descomposicionalidad de Simon. La emergencia débil de un sistema reducible puede expresarse formalmente como restricciones locales sobre las dinámicas intrínsecas de cada componente, y lo único que diferencia la descripción del sistema de la descripción de sus componentes es un cambio de resolución.

Por el contrario, en el concepto sistémico de emergencia, los estados de los componentes no se consideran individualmente, sino colectivamente, formando patrones globales. Así, las restricciones se ejercen sobre una colectividad de componentes, es decir, las restricciones son globales y no pueden reducirse a una combinación lineal de restricciones locales. Bar-Yam (2004) denomina a este tipo

de emergencia como fuerte, porque la colectividad emergente no es un mero recurso metodológico, sino una entidad con eficiencia operacional en la dinámica de los procesos del sistema. En una emergencia fuerte se constituye en el sistema una nueva escala colectiva, más amplia que la escala estructural de los componentes.

La escala de la colectividad expresa su consistencia ontológica en su capacidad de restringir globalmente los estados estructurales accesibles. Para un observador externo, esta coherencia global no se expresa directamente en los estados del sistema, sino en las restricciones sobre las transiciones de estados. En otras palabras, un observador externo no puede distinguir las restricciones globales de una emergencia fuerte con información estática de los estados. Es en las probabilidades de transición entre estados donde puede observarse la escala en la que una emergencia tiene eficiencia operacional (Bar-Yam, 2004). Así, en una emergencia débil, la escala del proceso es la de los componentes porque las restricciones son locales y podemos caracterizarlo exhaustivamente a través de probabilidades transicionales definidas sobre estados en la resolución de los componentes. Por el contrario, en las emergencias fuertes, las restricciones globales hacen que la resolución necesaria a la que debemos observar las transiciones de estados sea colectiva.

Las discusiones sobre el concepto fuerte de emergencia han sido tradicionalmente demasiado apasionadas y polarizadas (Bedau y Humphreys, 2008). Para ilustrar el concepto de emergencia fuerte desde una perspectiva que pacifique las discusiones, Bar-Yam (2004) elige un ejemplo de emergencia en sistemas formales: el bit de paridad. El bit de paridad es un método de detección de errores comúnmente empleado en computación. Para un cierto conjunto de bits (componentes con dos estados posibles), la regla que establece el valor del bit de paridad le asigna 1 si la suma de los valores del conjunto es par, y 0 si la suma es impar. Así, un cambio en cualquiera de los bits del colectivo cambiaría la paridad del sistema. Por tanto, en un sistema formado por un colectivo de bits en el que la conservación de la paridad actúa como restricción colectiva a las transiciones de estados accesibles a los componentes del sistema, la observación de las transiciones de estados en la resolución de un bit individual no permite al observador establecer cuál es la restricción que está operando sobre la evolución del sistema. Para poder observar la restricción es necesario describir las transiciones con una resolución colectiva, en este caso, la de todo el conjunto de bits. Cualquier otra resolución inferior mostraría equiprobabilidad en las transiciones entre los estados estructurales accesibles.

Bar-Yam (2004) distingue como el tercer y más fuerte tipo de emergencia, la emergencia ambiental, en la que la reducción del sistema a procesos estructurales restringidos localmente es todavía más complicada por el establecimiento de una relación dialéctica entre la colectividad y su ambiente. Este tipo de emergencia se caracteriza porque los comportamientos del sistema no pueden explicarse ni por sus propiedades elementales ni por sus propiedades colectivas. Por ejemplo, si nuestro sistema es una llave, la propiedad de que pueda abrir una puerta no está exclusivamente definida en la llave, es una propiedad relacional o disposicional que requiere incluir aspectos específicos del entorno con el que interactúa el sistema para su definición. Sin embargo, la propiedad de la llave para abrir una puerta puede definirse si tenemos en cuenta las propiedades disposicionales de la llave en relación a la puerta y de la puerta en relación a la llave sin hacer referencia a todo el conjunto posible de llaves y puertas. Un ejemplo más biológico de emergencia ambiental lo constituyen las funciones vitales que ha de realizar todo organismo (nutrición, relación y reproducción), que son inseparables de los aspectos específicos del entorno sobre los que se asienta su realización.

Del mismo modo que en una emergencia fuerte una resolución más pequeña que la colectiva no puede captar las restricciones globales, en una emergencia ambiental el ámbito de la descripción debe ampliarse para incluir los aspectos específicos del ambiente que soportan la función del sistema. En este sentido, el estudio de las adaptaciones comportamentales de un organismo requiere una descripción en un ámbito que permita observar cómo organismo y ambiente establecen la dialéctica que les define mutuamente (Bar-Yam, 2004; Kugler y Turvey, 1987; Levins y Lewontin, 1985; Shaw, Kadar y Kinsella-Shaw, 1994; Shaw, Kugler y Kinsella-Shaw, 1990; Turvey, 2009). La resolución de la descripción ha de ser tal que trate como elementales las propiedades relacionales que acoplan el organismo, como un todo, con su entorno. Como veremos más adelante, éste es el tipo de descripción propuesta por la psicología ecológica a través de su escala ecológica de análisis.

En una emergencia ambiental, la constitución de un sistema conlleva, necesariamente, la constitución complementaria del entorno sobre el que se asienta la existencia diferenciada del sistema. Ésta es una afirmación ontológica y no epistemológica sobre la relación entre los sistemas y sus entornos, pues lo que caracteriza a una emergencia ambiental es la aparición de nuevas escalas de interacción con su entorno. Por tanto, la constitución asimétrica de un sistema

ambientalmente emergente torna la realidad que lo incluye en su entorno específico y recíproco, capaz de soportar el conjunto de interacciones que dan lugar a los estados y evoluciones del sistema. Así, una emergencia ambiental implica una nueva significación del entorno, en el sentido de que el sistema accede a nuevas escalas del ambiente con formas inéditas de ser actuadas. De manera recíproca, si los procesos biológicos son el producto de emergencias ambientales debemos desplazar el eje de las explicaciones biológicas desde la red interna de interacciones hacia la red de interacciones organismo-ambiente. Esto no implica dejar a un lado la relevancia de la constitución orgánica de un ser vivo, al contrario, significa que debemos comprender la relevancia de la constitución orgánica no como algo intrínseco, sino desde el punto de vista de su coordinación con el entorno a múltiples escalas.

Para estudiar un proceso ambientalmente emergente debemos describir el sistema y sus interacciones ambientales en un ámbito y resolución apropiados a la escala del proceso. Sin embargo, las emergencias pueden presentarse anidadas a lo largo de múltiples escalas: lo que en una escala se constituye como un proceso colectivo emergente, en otra escala actúa como uno de los componentes de un colectivo emergente. Por tanto, en cualquier organismo confluyen simultáneamente procesos operantes en múltiples escalas, constituyéndose en cada una entornos diferenciados y adecuados a sus posibilidades de interacción, y en interacción a su vez con los resultados de procesos en otras escalas. Para poder dar cuenta del acoplamiento vertical entre procesos a distintas escalas, los efectos de procesos que se verifican en otras escalas deben expresarse igualmente en la escala del proceso que nos interesa, bien sea como restricciones locales a la dinámica intrínseca de los componentes en el caso de procesos de menor escala, o como restricciones globales que coordinan colectivamente los componentes, en el caso de procesos de mayor escala.

Para ilustrar esta afirmación, consideremos un ejemplo. Si nuestro interés es estudiar la interacción comportamental que se da entre un depredador y una presa, nuestra descripción debe considerar que el depredador se alimenta de manera directa de sus presas, y no de moléculas de carbohidratos, lípidos o polipéptidos. Es decir, la escala de sus interacciones comportamentales estará constituida por aspectos relativos a la obtención y consumo de presas. La escala molecular de interacción compete de manera directa a algunos de los componentes del depredador tales como membranas, transportadores o enzimas, pero tan sólo in-

directamente al organismo como un todo. Esta escala del organismo es necesaria pero no suficiente para la génesis de una interacción depredador-presa. Como científicos interesados en el comportamiento, debemos tener claro que no es posible que empleando únicamente combinaciones de procesos moleculares o fisiológicos, la presa se constituya como presa para el depredador. Esto sería confundir el efecto por la causa.

Un análisis de la escala estructural para comprender el comportamiento nos ofrece una descripción del espacio de posibilidades ofrecido por la estructura. Los procesos de adaptación comportamental dispondrán de esas posibilidades en coordinaciones apropiadas a sus interacciones con el entorno. Recordando a Dewey, la constitución de la presa como presa sólo puede suceder en el acto de cazar en el que se implica experiencialmente el depredador. Por esto, la referencia a interacciones moleculares para explicar la obtención de alimentos es un rodeo que sólo puede tener sentido si perseguimos una manipulación operacional de los mecanismos que sustentan el comportamiento. De nuevo, en ningún caso podremos explicar satisfactoriamente la dinámica del comportamiento de un organismo empleando únicamente predicados físico-químicos o neurobiológicos.

Podemos operacionalizar procesos que no comprendemos en absoluto pero cuyos resultados satisfacen algún criterio de validez externo al proceso, como en el caso de la inteligencia artificial fuerte (Minsky, 1961). Sin embargo, para explicar científicamente la multiciplidad de escalas que sustentan la adaptación comportamental sin violentar ni desdibujar ninguna de ellas en el proceso, debemos reconocer la importancia de comprender cada proceso en la escala en que se verifica su acoplamiento con el entorno y dejar atrás el dogma de que el conocimiento científico sólo puede consistir de explicaciones mecanicistas o estructurales. Para ser útil, el análisis mecanístico-estructural debe considerar redes de interacciones coordinadas en lugar de componentes discretos aislados. Esta escala de análisis establece las posibilidades sobre las que se asienta la emergencia, y la manifiesta como una constricción global a la dinámica estructural.

A continuación presento una clasificación de los modos en que un sistema natural emergente ambientalmente puede implicarse dialécticamente con su entorno. El criterio que he empleado para clasificar estos modos dialécticos es la intensidad con que las leyes naturales y las restricciones materiales y energéticas del entorno determinan la evolución del sistema. Como veremos, este criterio es relevante por su estrecha relación con el tipo de autonomía y de significación que

un sistema complejo realiza. De esta forma podemos conocer el tipo de causalidad ambiental que controla de manera directa la evolución del proceso y orientar consecuentemente la búsqueda de explicaciones científicas.

### 1.2.3 Modos de la dialéctica ambiental

Un sistema natural ambientalmente emergente establece una escala macroscópica de interacción con el entorno. El sistema cambia y opera con el entorno en una escala espacio-temporal mayor que la de sus componentes. Por este motivo, el sistema puede movilizar más energía durante periodos más largos de tiempo. Como resultado, el sistema emergente reduce la inmediatez de su dependencia energética y material del entorno, y las respuestas a los cambios del entorno no tienen que ser reactivas o necesarias. El sistema tiene de esta forma la posibilidad retrasar, dilatar o concentrar sus respuestas adaptativas a los cambios del entorno y, a través de las nuevas posibilidades de relación con el entorno que emergen en la macroescala, acceder a nuevos nichos y oportunidades de adaptación. Mi propuesta es que atendiendo al grado de inmediatez del determinismo de las leyes físicas sobre la dinámica del sistema, podemos distinguir en los sistemas naturales ambientalmente emergentes modos cualitativamente distintos de constituirse dialécticamente con su entorno: el disipativo, el metabólico, el informacional y el social. Veamos cada modo con más detalle.

#### Dialéctica ambiental disipativa

El primer modo de la dialéctica ambiental es el disipativo. Los sistemas naturales más simples que pueden presentar esta dialéctica ambiental son sistemas físico-químicos autoorganizados en respuesta a condiciones ambientales energizantes. La generación de estados de coherencia global sucede espontáneamente en sistemas físico-químicos formados por colectividades alejadas del equilibrio termodinámico (Haken, 1977, 1983; Prigogine, 1978; Prigogine y Nicolis, 1971; Soodak y Iberall, 1978; Swenson, 1997; Swenson y Turvey, 1991; Tschacher y Haken, 2007). Estos sistemas movilizan energía suficiente como para escapar de la escala de la estocasticidad térmica del ambiente y generar un trabajo útil. Lo peculiar de los sistemas constituidos en una dialéctica disipativa es que el trabajo útil que generan tiene la finalidad de cancelar el desequilibrio local con el entorno que los había generado de la manera más rápida posible. Por esto, la permanencia en el

tiempo del sistema depende de que el entorno sea lo suficientemente grande como para amortiguar el efecto disipativo del sistema.

Un sistema disipativo es capaz de disipar energía más rápidamente que procesos estocásticos como la difusión. Cuanto más alejado del equilibrio o más organizado se encuentre el sistema, más rápidamente disipa energía y, por tanto, mayor es la resistencia que opone a las perturbaciones ambientales. En este sentido, podemos decir que en su forma más elemental, la dialéctica disipativa genera procesos con dinámicas pseudoteleológicas (Tschacher y Haken, 2007). Así, un observador externo puede juzgar el grado de organización de un sistema disipativo en base a este principio: cuanto mayor sea la energía necesaria para mantener un cierto gradiente a lo largo de un sistema, mayor es el grado de organización de dicho sistema.

La sinérgica propone un estudio formal generalizado de los sistemas disipativos a través del concepto de sinergia (también conocido como estructura de coordinación), que designa las emergencias ambientales que constituyen su objeto de estudio. Según la sinérgica, estas emergencias ambientales pueden darse en sistemas de cualquier escala y composición material, ya que en tanto que ley física puede aplicarse a cualquier colectividad en desequilibrio material o energético con su entorno. La hipótesis de la sinérgica es una hipótesis general acerca de cómo la naturaleza maneja la complejidad. Las sinergias son agrupaciones funcionales de los elementos estructurales (por ejemplo, rutas enzimáticas, neuronas, músculos o grupos de organismos) que están restringidas temporalmente para actuar como una sola unidad coherente. Así, las sinergias surgen en muchos contextos y en muchas escalas de la organización biológica, desde la molecular a la social. El contenido concreto o semántica de la sinergia dependerá de las propiedades disposicionales de los componentes en interacción, y de la escala en que se verifican tanto los procesos elementales como los procesos emergentes.

La sinérgica se basa en la observación de que el comportamiento de muchos sistemas está fuertemente influenciado por las condiciones ambientales (Haken, 1977, 1983; Tschacher y Haken, 2007). Entre estas condiciones podemos diferenciar constricciones más o menos constantes que actúan como el contorno en el que evoluciona el sistema, y condiciones que lo energizan o dirigen. Estas condiciones energizantes se denominan parámetros de control, pues controlan la evolución del sistema. En muchos casos, los parámetros de control toman la forma de gradientes ambientales que se aplican sobre el sistema, como un gradiente térmico. Cuan-



do el efecto energizante de los parámetros de control rebasa un límite crítico, el sistema se vuelve inestable y puede evolucionar hacia estados organizativamente distintos.

Próximo a una inestabilidad, el comportamiento de un sistema con múltiples grados de libertad puede describirse por medio de pocas magnitudes, denominadas parámetros de orden. El principio de eliminación adiabática demuestra que cuando dos procesos cuya dinámica evoluciona en escalas temporales suficientemente distintas se acoplan, el proceso con la dinámica más rápida tenderá a converger hacia la región del espacio de estados definida por el proceso con la dinámica lenta (Haken, 1977, 1983; Tschacher y Haken, 2007). Este es el mecanismo dinámico por medio del cual los parámetros de orden esclavizan los grados de libertad de las interacciones que lo generan. Por su parte, los componentes del sistema reaccionan frente al parámetro de orden y, de esta forma, son quienes en última instancia van a generar el nuevo estado de organización por medio de la dialéctica entre el sistema emergente y las tendencias intrínsecas de sus componentes. Ésta es la primera dialéctica de que nos habla la sinérgica.

Las células de convectivas formadas en el agua al ser calentada asimétricamente en un recipiente son un ejemplo cotidiano de este principio. Cuando el gradiente térmico es bajo y el sistema está próximo al equilibrio, el mecanismo de disipación de energía es la conducción, que tiene muy poca eficiencia pero es suficiente para mantener al sistema en un estado estacionario. Sin embargo, cuando aumentamos el gradiente aplicado, el sistema reacciona buscando formas más eficientes de disipar la energía hasta que, a un cierto valor crítico del gradiente térmico, comienza el movimiento convectivo en células altamente organizadas espacio-temporalmente. Así, la aparición de un parámetro de orden (la coherencia en el movimiento de las moléculas del líquido) produce una influencia sobre el parámetro de control, pues el sistema es capaz de disipar más energía. Ésta es la segunda dialéctica de que nos habla la sinérgica en sistemas que se desarrollan entre gradientes.

### **Dialéctica ambiental metabólica**

El segundo modo dialéctico ambiental es el metabólico. La emergencia de una dialéctica ambiental metabólica supone la coordinación de una colectividad de sistemas disipativos en un sistema de interacciones metabólicas que actúa para preservar el desequilibrio energético y material con el entorno que lo constituye.

Al contrario que los sistemas disipativos, los sistemas metabólicos poseen una auténtica teleología intrínseca que consiste en su propia conservación. Gracias a esta dialéctica de auto-conservación, los sistemas metabólicos son el sistema natural más simple que puede desarrollar una historia de interacciones con el entorno. En esta historia de interacciones se constituye la identidad del sistema como la idiosincrasia de sus procesos adaptativos, esto es, su perspectiva del entorno. De esta forma, la teleología de auto-conservación metabólica establece el punto vista desde el que el sistema significa el entorno.

En un sistema metabólico, una colectividad de sistemas disipativos se acoplan para generar una coordinación que tiende a su propia conservación. Cada proceso disipativo por separado carece de significación, ya que actúa por necesidad física para restaurar lo antes posible el equilibrio termodinámico. Es sólo a través del papel que un proceso disipativo juega en la coordinación del sistema metabólico que la dialéctica disipativa participa en el proceso de semiosis. En la dialéctica metabólica, la semiosis está inscrita en los acoplamientos entre las redes de procesos metabólicos y las perturbaciones ambientales que pueden afectar significativamente a la conservación de la dialéctica metabólica (Di Paolo, 2005; Jonas, 1966/2001; Pattee, 1972, 1982; Varela, 1994). Los sistemas metabólicos reaccionan sólo frente a aquellas influencias ambientales que facilitan o dificultan el mantenimiento de la dialéctica metabólica que les caracteriza.

Los sistemas metabólicos, como los disipativos, se fundamentan en una dialéctica ambiental que puede darse independientemente de la escala de los componentes que los forman. La dialéctica metabólica caracteriza de manera general a los sistemas que regulan homeostáticamente los flujos energéticos y materiales que los atraviesan. Este tipo de dialéctica ambiental caracteriza las relaciones con el entorno de los procesos fisiológicos orgánicos, los procesos ecológicos o los procesos socio-económicos entre otros. En condiciones normales, estos sistemas llevan a cabo dialécticas mucho más autónomas que la metabólica, es decir, realizan su dialéctica metabólica de acuerdo a las restricciones globales que impone una coordinación más amplia. Cuando el sistema se encuentra en estados de precariedad energética o material, las restricciones locales que la dialéctica metabólica impone a todos los componentes del sistema se convierten en la restricción dominante. De esta forma, aunque la interacción del sistema con el entorno sucede necesariamente en la escala emergente en que se individualiza el sistema, bajo condiciones de precariedad material la regulación de esas interacciones se lleva a cabo según

una dialéctica metabólica. El sistema entra en una fase de reducción de sus posibilidades de interacción. Estos estados de precariedad metabólica toman distintos nombres y significados en función del sistema considerado (enfermedades en organismos, degradación en ecosistemas o crisis en economías), pero comparten la restricción de las posibilidades de interacción como unidades debido a la dictadura de las condiciones materiales de existencia.

La escala más microscópica en la que puede sostenerse una dialéctica metabólica es la molecular. La importancia dinámica de los procesos estocásticos en la escala molecular hace que el control de los procesos difusivos sea fundamental para el establecimiento de una dialéctica metabólica, ya que debilitan la coordinación metabólica al dispersar los componentes del sistema. La forma más parsimoniosa y económica de controlar los efectos negativos de la difusión sobre un sistema metabólico molecular consiste en reducir las dimensiones espaciales del sistema (Wächtershäuser, 1988). Si los componentes del sistema metabólico están unidos a una superficie de dos dimensiones (pero con cierta libertad para difundir dentro de ella), la probabilidad de colisión de dos componentes es mucho mayor que en el espacio tridimensional de una disolución, al tiempo que la energía de activación de las reacciones es más baja por la disminución de los grados de libertad mecánicos de las moléculas. En conjunto, un metabolismo de superficie permite velocidades de reacción mucho más altas, requiere gradientes energéticos más bajos, y aprovecha el efecto quimio-protector y catalítico de un sustrato mineral activo.

Esta es la idea clave de la teoría del mundo hierro-sulfuro o del metabolismo en superficie (Wächtershäuser, 1988). La teoría de Wächtershäuser parte de la consideración de que un sistema metabólico acopla cíclicamente reacciones químicas que producen energía (exergónicas) con reacciones que necesitan energía (endergónicas), y reacciones que forman moléculas complejas (anabólicas) con reacciones que las destruyen (catabólicas), con el objetivo de controlar el equilibrio químico global entre los reactivos y los productos. La idea de Wächtershäuser es que una vez que se establece en la superficie mineral un ciclo metabólico primitivo, éste comienza a producir compuestos cada vez más complejos. Las condiciones ambientales requeridas para la formación espontánea de un metabolismo de superficie son altamente energizantes y reductoras (semejantes a las de una chimenea magmática submarina), y han de ser mantenidas relativamente constantes durante periodos suficientemente largos de tiempo. Estas peculiaridades

ambientales hacen muy complicado encontrar en la actualidad sistemas naturales cuya dialéctica sea exclusivamente metabólica. Y de llegar a aparecer, el energéticamente enriquecido sistema metabólico debería enfrentarse al problema de ser desorganizado por los procesos digestivos de las bacterias con las que habría de compartir el entorno. Sin embargo, hoy día no es tan extraño encontrar sistemas metabólicos artificiales en los tubos de ensayo de un laboratorio.

En suma, la dialéctica metabólica nos permite caracterizar las interacciones con su entorno de sistemas metabólicos prebióticos o de cualquier organización que regule activamente sus flujos de materia y energía con el entorno y esté sujeta a situaciones de precariedad. Sin embargo, a medida que los sistemas con una dialéctica metabólica aumentan su escala y complejidad, y adquieren pleno control de su frontera tridimensional con el entorno, el metabolismo deja de ser la razón de los cambios de la unidad organizacional. En estos sistemas, la dialéctica metabólica es necesaria pero no suficiente para dar cuenta de sus interacciones con el entorno, porque son capaces de regular sus interacciones por medio del valor informativo de los estados energéticos ambientales. Comprender los fenómenos de adaptación a que da lugar la dialéctica informacional requiere una teoría que dé cuenta de la significación generada en la experiencia del organismo de su entorno más allá de la semiosis metabólica. Para esto, es necesario introducir el tercer modo de interacción con el ambiente, que considera interacciones ambientales informacionales presentes en la escala ecológica del organismo. Sin embargo, antes consideraré la cuestión de las teorías de la vida que la consideran una emergencia débil de los procesos moleculares y afirman que la dialéctica metabólica es suficiente para explicar la autonomía de los organismos.

### **Teorías metabólicas de la vida**

Diversas teorías de la vida han visto en la dialéctica metabólica el principio fundamental de la organización biológica. Entre las más relevantes, la irreductibilidad estructural de Polanyi (1968), la teoría autopoietica de Maturana y Varela (Maturana, 1978; Varela y Maturana, 1973/1994) o la teoría de los sistemas metabolismo-reparación de Rosen (1970). Me centraré en la terminología de la teoría autopoietica para exponer el enfoque estructural aplicado a la vida. La autopoiesis caracteriza la célula como una organización invariante generada en el funcionamiento coordinado y adaptativo de sus redes metabólicas. El ámbito de la descripción de las teorías estructurales de la célula es el espacio interior a la

membrana celular, y su resolución es típicamente la de los componentes moleculares de la célula. Por tanto, el método que la teoría autopoietica propone para estudiar la célula consiste en analizar cómo las interacciones regulatorias de la estructura metabólica con su entorno permiten el mantenimiento de la invarianza organizacional (Barandiarán y Egbert, 2014; Varela et al., 1974).

Sin embargo, desde la teoría autopoietica no se acostumbra a hacer explícito si la célula es considerada como el producto de una emergencia fuerte o débil. Por un lado, su énfasis en una metodología estructural para definir la autonomía celular parece indicar que la célula es una emergencia débil, una consecuencia de la operación de la red de procesos metabólicos. En esta interpretación, el término organización es utilizado como un concepto hueco y delimitador (semejante al infinito en matemáticas), que dispone en torno a una idea común la multiplicidad de procesos moleculares, pero del que nunca se dice nada de manera explícita. Por otro lado, en la teoría autopoietica podemos también encontrar un concepto de organización equiparable al principio de clausura a causa eficiente en sistemas no-predicativos de Rosen (1970). En esta interpretación, la organización es el sistema metabólico en tanto que unidad que opera en un dominio de interacciones cualitativamente distinto del dominio de los componentes. Esta interpretación invita a pensar que la célula es una emergencia fuerte capaz de restringir los estados estructurales, y con una existencia efectiva en su dominio operacional y no epistémicamente derivada de la dinámica metabólica. Así pues, obtenemos versiones diametralmente opuestas de la teoría autopoietica según la consideración que se haga del concepto de organización y de su relación de determinación con la estructura metabólica.

Este conflicto interno de la teoría autopoietica se plasma con claridad en el prólogo de los autores a la segunda edición de 'De máquinas y seres vivos' (Varela y Maturana, 1973/1994). Cada autor dedica un prólogo a discutir veinte años después de su primera publicación cómo y por qué surgió la teoría autopoietica, así como la relevancia contemporánea del concepto. Maturana empieza recordando el contexto académico contra el que su pensamiento estaba intentando reaccionar:

A mí me parecía al escucharlos [a Marvin Minsky y otros investigadores en inteligencia artificial], que lo que ellos hacían no era modelar ni imitar a los fenómenos biológicos, sino imitar o modelar la apariencia de éstos en el ámbito de su visión como observadores. [...] Evitar ese error no era fácil, pues el discurso biológico de esa época

era un discurso funcional, propositivo, y se hablaba de los fenómenos biológicos como si éstos quedasen de hecho revelados al hablar de la función que se les atribuía, y como si la descripción de la función especificase los procesos relacionales que le daban origen. Yo pensaba que no era adecuado hablar así ni tan sólo metafóricamente, porque me parecía que ese modo de hablar ocultaba conceptualmente el operar que daba origen al fenómeno biológico que se quería comprender. (p. 14).

La posición de Maturana frente a la inteligencia artificial de los años 60 es comprensible. Su propuesta para explicar el comportamiento adaptativo adolece de un funcionalismo ingenuo y antropocéntrico. Como comentaba más arriba, el modelo de regulador central que fundamenta la investigación en inteligencia artificial impone la perspectiva del diseñador de máquinas. Desde esta perspectiva sólo podemos producir sistemas con una autonomía extrínseca, regulados por la operación de modelos simbólicos inteligibles para el diseñador. Sin embargo, la respuesta de Maturana es un mecanicismo reduccionista que estipula que los mecanismos estructurales son la única fuente de causalidad en un sistema complejo: “Yo quería describir el operar de los componentes del ser vivo en términos exclusivamente locales, no funcionales, y no propositivos. Yo quería mostrar cómo el ser vivo surgía de la dinámica relacional de sus componentes de una manera ajena a toda referencia a la totalidad a que éstos daban origen.” (Varela y Maturana, 1973/1994, p. 14). Maturana no deja dudas de que el objetivo fundamental de la teoría autopoietica es describir la vida como el producto exclusivo de la operación de procesos físico-químicos, es decir, la reducción de la vida a mecanismos moleculares que operan localmente, sin ser afectados en absoluto por la funcionalidad que cumplen en el organismo y, por tanto, sin atribuirles finalidades o propósitos. Hasta ahora, parece claro que la teoría autopoietica se opone frontalmente a la causalidad circular del todo sobre las partes que supone una emergencia fuerte. El todo al que Maturana se refiere en este fragmento es un todo epistemológico, completamente explicable a través de los mecanismos estructurales.

Sin embargo, hacia el final de su prólogo, Maturana nos deja una reflexión acerca de la relación entre la unidad y la estructura que aparentemente contradice lo escrito páginas antes:

Los seres vivos existimos en dos dominios, en el dominio de la fisiología donde tiene lugar nuestra dinámica corporal, y en el dominio de la

relación con el medio, donde tiene lugar nuestro vivir como la clase de seres que somos. Estos dos dominios, aunque disjuntos se modulan mutuamente de una manera generativa, de modo que lo que pasa en uno cambia según lo que pasa en el otro. (Varela y Maturana, 1973/1994, p. 27).

Maturana ahora afirma que el dominio de la organización y el dominio de la estructura se modulan mutuamente, de manera generativa. Sin embargo, esto implica que el sistema metabólico está sujeto a las restricciones globales que impone el dominio de las interacciones del organismo o, lo que es lo mismo, que el comportamiento del organismo no está totalmente determinado estructuralmente. Esta contradicción tan fundamental es sintomática de una carencia esencial en la explicación mecanicista que la teoría autopoietica puede ofrecer de la organización celular.

Francisco Varela no titubea al asumir la existencia de esta contradicción en su prólogo al mismo libro, y propone su teoría enactivista como solución al solipsismo estructural de la organización autopoietica:

A menudo se ha hecho la crítica que la *autopoiesis*, tal y como está expuesta en este libro, lleva a una posición solipsista. Por lo que acabo de decir, yo pienso que ésta es una crítica que tiene cierto mérito. La tentación de una lectura solipsista de estas ideas deriva de que la noción de perturbación en el acoplamiento estructural no toma adecuadamente en cuenta las regularidades emergentes de una *historia* de interacción en donde el dominio cognitivo no se constituye ni internamente (de un modo que lleva efectivamente al solipsismo), ni externamente (como quiere el pensamiento representacionista tradicional). En estos últimos años he desarrollado una alternativa explícita que evita estos dos escollos, haciendo de la reciprocidad histórica la clave de una *codefinición* entre un sistema autónomo y su entorno. Es lo que propongo llamar el punto de vista de la *enacción* en la biología y ciencias cognitivas. (Varela y Maturana, 1973/1994, p. 35).

El enactivismo de Varela da un rol causal a las interacciones del sistema autónomo con su entorno, y por tanto es un marco teórico mucho más próximo a la propuesta que aquí se defiende que la teoría autopoietica original. Sin embargo, no queda claro en la propuesta de Varela ni en el enactivismo en general si esa reciprocidad se concibe como una interacción entre la emergencia fuerte de un sistema

autónomo y su entorno, o como una emergencia ambiental, en la que la autonomía funcional no reside en el sistema sino en la dialéctica ambiental entre el sistema y su entorno (Barandiarán, Rhode y Di Paolo, 2009). En otras palabras, no queda claro hasta qué punto el enactivismo está dispuesto a dejar en un segundo plano el determinismo estructural para entender la autonomía de los organismos como una coordinación ambiental de procesos estructurales desde el dominio de la experiencia.

Lo que Varela sí deja claro es que las teorías estructurales de la célula explican las propiedades de la interacción celular con el ambiente en la escala de las perturbaciones energéticas y materiales sobre el metabolismo. Esto es así por definición, ya que las perturbaciones no afectan a la organización, que es invariante y caracteriza al organismo, sino sólo a la estructura metabólica. Si se produce un cambio en la organización, éste sólo puede ser su extinción, es decir, la muerte del organismo. En este sentido, es interesante recordar las palabras de Rosen (1970) al respecto de los límites de la metodología estructural para comprender los sistemas vivos: “Hemos descuidado los problemas de desarrollo y, más concretamente, hemos descuidado los problemas evolutivos, [...] hemos indicado los estados instantáneos del mundo biológico, pero no las fuerzas que actúan sobre ellos para producir cambios de estado, ni las ecuaciones de movimiento que estas fuerzas producen.” (p. 12).

El análisis estructural no sólo olvida las dimensiones ontogenéticas y filogenéticas, antes de nada, desestima el valor causal y explicativo de la dimensión ecológica y relacional de los organismos (Swenson, 1992). La explicación que el análisis estructural puede ofrecer de comportamientos celulares tales como la fagocitosis, la reproducción o las relaciones ecológicas con otros organismos se limitan a considerar los cambios estructurales concomitantes a las interacciones celulares, es decir, en una escala metabólica. Las teorías estructurales persiguen una explicación mecanicista de los fenómenos, para lo que han de asumir que los sistemas complejos son reducibles, es decir, que no hay nada más que explicar acerca de las interacciones celulares más allá de cómo sus mecanismos homeostáticos se acoplan a las perturbaciones ambientales.

### **Dialéctica ambiental informacional**

El tercer modo dialéctico ambiental es el informacional. En este modo, el organismo opera como una colectividad autoorganizada que regula su comportamiento



en base al valor informativo de la estructura de la energía en el ambiente. A medida que sistemas con una dialéctica metabólica aumentan su escala y complejidad, se va constituyendo una escala nueva de interacción con el entorno. Como identifican las teorías autopoietica y enactivista (Barandiarán et al., 2009; Varela y Maturana, 1973/1994), la incorporación a la red de procesos homeostáticos del control de la frontera tridimensional con el entorno fue uno de los pasos fundamentales para el origen de la vida. La delimitación activa de la frontera espacial del sistema como una unidad discreta permite constituir un dominio de interacciones con el entorno en una escala macroscópica alejada de la estocasticidad molecular. Así, el dominio de interacciones que aparece en el origen de la vida es la dialéctica informacional, que se caracteriza por incorporar al dominio operacional del sistema las interacciones de baja energía con el entorno. La teoría ecológica de la percepción directa (Gibson, 1979) propone un estudio naturalizado de la dialéctica informacional de los organismos. Esta teoría será explicada en mayor profundidad en la sección siguiente y en los Capítulos 4 a 6. A continuación, expongo brevemente los aspectos más básicos de la percepción directa que ya se pueden observar en toda su extensión en la dialéctica informacional celular, así como algunos aspectos relevantes de la organización pluricelular.

Alejada en su dominio de interacciones ambientales del ruido térmico de la escala molecular, una célula es capaz de adaptar su comportamiento frente a las interacciones ambientales de alto monto energético (que pueden ser muy beneficiosas o muy perjudiciales para la conservación del organismo) utilizando la estructura en las interacciones ambientales informacionales de bajo monto energético (que tienen relativamente poco impacto material o energético sobre el sistema). Así, en la escala macroscópica del organismo, la distribución de la energía electromagnética en la luz, o la distribución de la energía electroquímica en una disolución, está altamente estructurada como consecuencia de las restricciones que imponen las leyes naturales a las transformaciones de dichos campos energéticos. Gracias a esta abundancia de restricciones, la estructura de los campos energéticos de baja intensidad es capaz de especificar de manera directa propiedades de la relación organismo-ambiente relevantes para el control de sus interacciones de alta energía. Lograr la detección de especificidades relevantes para el control de la acción no es un proceso misterioso ni el producto de una determinación extrínseca, simplemente requiere una adecuada coordinación de los procesos orgánicos respecto de los objetivos del organismo (Jacobs y Michaels,

2007; Runeson, 1977).

La organización pluricelular es una dialéctica social que coordina una colectividad de células que interactúan en un medio cuya regulación se ha incorporado a la coordinación que constituye al organismo colectivo (en el punto siguiente aclaro brevemente las características de la dialéctica social). Dado que un sistema pluricelular regula activamente su frontera tridimensional con el entorno, el sistema emergente es capaz de operar como un único organismo, estableciendo su propia semiosis del entorno a través de dialécticas ambientales propias. La regulación sistémica de la frontera y la estructura celular del organismo permite la emergencia del proceso de desarrollo ontogenético. El desarrollo ontogenético lleva la historicidad de la dialéctica ambiental a un nivel cualitativamente distinto. A lo largo de las múltiples escalas espacio-temporales de los procesos de desarrollo, todas las dialécticas ambientales que el organismo establece con su entorno están sujetas a un proceso histórico de selección y diferenciación que es acentuado por el estrecho acoplamiento vertical entre escalas (Elman et al., 1996; Gottlieb, 2007; Levins y Lewontin, 1985; Oyama, Griffiths y Gray, 2001; Schneirla, 1966).

Paralelamente, el cambio de escala que suponen las organizaciones pluricelulares permite acumular mucha más materia y energía en el sistema, aumentando su resiliencia (Holling, 1973; Swenson y Turvey, 1991; Swenson, 1997) y liberando definitivamente al organismo de las vicisitudes de una inmediatez causal impuesta por la necesidad metabólica. El progresivo desarrollo de organismos más grandes, con estructuras anatómicas especializadas en la recepción de cambios en los estados de la energía del ambiente y posibilidades de interacción con el entorno cada vez más complejas y anidadas permitió el acceso a escalas más grandes de especificidad informacional de la energía en el ambiente.

En la sección siguiente, describo con más detalle el marco teórico y metodológico que propone la psicología ecológica para estudiar los procesos de significación ambiental basados en especificidades en la dialéctica informacional, especialmente en lo que respecta a su teoría de las affordances (ya que otros aspectos de la teoría ecológica son tratados en profundidad en los capítulos 4 a 6). Pero antes, discutiré brevemente los aspectos fundamentales de la dialéctica social. Dado que los procesos que competen a este tipo de interacción quedan fuera del ámbito de esta tesis, el objetivo de este punto es simplemente dar una pincelada que facilite la comprensión de la perspectiva dinámica y ecológica del comportamiento social, de los procesos de simbolismo y de la percepción indirecta.

### **Dialéctica ambiental social**

El cuarto modo dialéctico es el social. La dialéctica ambiental social se caracteriza por la constitución de significados compartidos en grupos de organismos que operan restringiendo (coordinando) las posibilidades de la colectividad de sistemas. En la dialéctica informacional, los significados se constituyen únicamente respecto de la experiencia significativa entre el organismo y su entorno, y para comprender cómo articulan el comportamiento, sólo necesitamos referirnos a la compatibilidad entre el organismo y su entorno. Por el contrario, en la dialéctica social el valor informacional de las interacciones con el entorno requiere la participación de una colectividad de organismos. En otras palabras, los significados de los eventos en una dialéctica social existen porque son compartidos por un grupo (Wittgenstein, 1953/2008).

En su forma más simple, el significado compartido está especificado de manera directa en la dialéctica informacional del organismo. Éste es el caso de los significados compartidos en sociedades de insectos. Por ejemplo, un proceso de vital importancia para esas sociedades es la especificación de la identidad del hormiguero (Schneirla, 1966). En función de esa propiedad, el encuentro de dos individuos cualesquiera se saldará con ayuda mutua o con agresividad mortal. Por tanto, es un significado compartido porque sólo tiene sentido si consideramos que su función es delimitar el hormiguero como una unidad y coordinar el comportamiento de sus miembros en consecuencia. Sin embargo, esta propiedad se basa en información química que la actividad de la propia colonia va generando espontáneamente. Un gran número de compuestos químicos participan en la determinación de la identidad de la colonia, cuyas concentraciones y distribuciones pueden variar a lo largo del tiempo. Así, es una identidad convencional especificada en la distribución dinámica de una serie de compuestos químicos, y no es responsabilidad directa del comportamiento de ningún subconjunto de la colonia coordinado intencionalmente. En este sentido, el significado es compartido pero está especificado unívocamente en la evolución de un patrón químico. Por esto, este tipo de dialéctica social puede realizarse con los mecanismos de percepción directa de la dialéctica informacional, como en el ejemplo de la pluricelularidad presentado en la sección anterior.

En su forma más compleja, la dialéctica social se construye en torno a significados consensuados, es decir, producto de la actividad de un grupo de organismos coordinados intencionalmente. Los estados significativos ya no están necesaria-

mente especificados a través de las restricciones de la energía en el entorno impuestas por leyes más o menos generales como las físicas, químicas o biológicas. A medida que en la dialéctica social la distribución de la energía en el ambiente es restringida por la coordinación intencional, se dificulta la especificidad informacional y con ella, la posibilidad de una percepción directa. Ejemplos de este tipo de dialéctica podemos encontrarlos en la elección intencional de la pareja alfa que dominará la jerarquía de grupos animales sociales, o en cualquier interacción simbólica de las que realizamos cotidianamente en nuestro entorno social, como por ejemplo, leer este texto. Dado el carácter convencional de los significados consensuados intencionalmente, este tipo de dialéctica requiere de la participación de procesos inferenciales y de percepción indirecta cuando las restricciones naturales a la dialéctica informacional son insuficientes para especificar unívocamente los significados consensuados.

La relación entre los procesos de percepción directa e inferencial parece ser la de una complementariedad dinámica (Runeson, 1977; Pattee, 1972, 1982). Así, cabe la posibilidad de que algunos procesos de significación compartida sean suficientemente especificados por las restricciones naturales a los patrones energéticos ambientales, como se ha demostrado, por ejemplo, en la percepción de algunos rasgos fonéticos del lenguaje (Viswanathan, Magnuson y Fowler, 2010). Igualmente, la familiaridad con un comportamiento basado en procesos inferenciales puede fijarse en hábitos, que proyectan el dominio de significación de una dialéctica social sobre el dominio de significación informacional, como en el caso de los deportistas expertos (Beek, Jacobs, Daffertshofer y Huys, 2003). Lo que no cabe dudar es que la percepción directa es la condición de posibilidad para la existencia de percepción indirecta y procesos inferenciales.

#### 1.2.4 Coordinación multi-escala de los modos dialécticos

Según hemos visto, los sistemas naturales emergentes pueden involucrarse en distintos tipos de dialécticas con su entorno que constituyen espacios de significación operacionalmente disjuntos pero en estrecha interacción a través de sus restricciones recíprocas. Los distintos modos de la dialéctica no son excluyentes sino selectivos. La dialéctica metabólica no excluye a la dialéctica disipativa, simplemente la realiza en una forma más selectiva. Así, un sistema metabólico es básicamente un sistema disipativo que lleva a cabo esa disipación de una manera más restringida. De igual manera, la dialéctica informacional no se contrapone a

la dialéctica metabólica. Un organismo cognitivo no es sino un sistema metabólico que realiza sus procesos metabólicos de una manera más selectiva o específica. Finalmente, la dialéctica social no se contrapone a la dialéctica informacional. Un organismo social es en última instancia un organismo cognitivo que selecciona sus procesos de percepción y acción para adaptarse a las restricciones que operan en el dominio social del organismo.

La investigación del comportamiento a través de dialécticas con el entorno realizadas por partes o subconjuntos del organismo da lugar a un amplio abanico de escalas de análisis y objetos de estudio. Sin embargo, lo relevante para la comprensión del comportamiento radica en el papel que los procesos estudiados juegan en la coordinación experiencial del organismo. Por ejemplo, en el control motor confluyen procesos dinámicos a múltiples escalas cuyas propiedades globales se reconfiguran contextualmente. En una escala a medio camino entre el órgano y el sistema, las sinergias musculares son patrones espacio-temporales de activación del sistema neuromuscular que se autoorganizan a múltiples escalas como respuesta a unos objetivos y un contexto especificados informacionalmente en la dialéctica del organismo con su entorno. Al mismo tiempo, una sinergia muscular puede ser aproximada como una dialéctica ambiental disipativa, un proceso natural y espontáneo en sistemas que se desarrollan entre gradientes. Sin embargo, esta dinámica natural no es autónoma: los parámetros de control que conducen este proceso natural espontáneo se especifican en la dialéctica informacional del organismo. En otras palabras, la descripción de un comportamiento a través de los procesos que participan en su desarrollo se hace autónoma en la escala ecológica del organismo.

Como explicaba más arriba, en los organismos pluricelulares, los sistemas de desarrollo producen una constelación de escalas estructurales anidadas que se constituyen en dialécticas ambientales específicas de su dominio operacional y se acoplan verticalmente entre sí. En estos sistemas, un pequeño cambio de un proceso en cualquier escala puede tener grandes consecuencias en las dialécticas que el organismo establece en escalas temporales mucho más largas que las del proceso que inició la cascada de interacciones. Así, desde la perspectiva ontogenética multi-escala de la teoría de sistemas de desarrollo (DST, por sus siglas en inglés; Oyama et al., 2001; Gottlieb, 2007; Levins y Lewontin, 1985), el concepto de causa próxima para comprender el comportamiento pierde poder explicativo, ya que el entramado de relaciones entre procesos a todas las escalas es tan denso que

hace muy complicado identificar el papel en el proceso ontogenético de cada una de las dialécticas ambientales estructurales implicadas.

La amplitud temporal de la perspectiva de la DST coloca en un segundo plano la experiencia significativa del entorno que constituye al organismo como unidad operacional, y como objeto de estudio de la psicología. En este sentido, la DST complica la comprensión de las causas próximas que operan en el dominio operacional del comportamiento, es decir, en la escala ecológica de análisis. Así, sin negar la validez y relevancia de las explicaciones ontogenéticas multi-escala de la DST, un estudio psicológico de la experiencia es compatible e igualmente necesario. En la escala del comportamiento, la multiplicidad de escalas y procesos en interacción se observa en la autosimilaridad fractal (Van Orden et al., 2003) y multifractal de sus series temporales (Kelty-Stephen et al., 2013). A continuación, presento el modo de vida de un anfibio muy peculiar para ejemplificar cómo procesos a múltiples escalas participan en la consecución de comportamientos adaptativos.

El lago Titicaca es un lugar frío (10 °C) y a gran altitud (3.812 m) que durante los periodos interglaciares del cuaternario ha sufrido un progresivo aislamiento biogeográfico por la formación de gradientes físicos muy fuertes con los territorios circundantes. En esas condiciones es frecuente que las poblaciones aisladas den lugar a endemismos, es decir, nuevas especies de organismos cuyos modos de vida están adaptados a las peculiaridades de los nichos ofrecidos por el lago y que por motivos históricos sólo se dan allí. Uno de los endemismos más característicos del lago Titicaca, la rana gigante (*Telmatobius culeus*), presenta una combinación de adaptaciones comportamentales, morfológicas y fisiológicas que le permiten la vida acuática en las precarias condiciones que el lago puede ofrecer a un anfibio (Hutchison, Haines y Engbretson, 1976). La función respiratoria en los anfibios se realiza mayoritariamente a través de la piel, que tiene una capacidad de intercambio de gases mucho menor que la de sistemas respiratorios pulmonados. Sin embargo, a casi 4000 m de altitud, la baja presión atmosférica determina que el agua se sature de O<sub>2</sub> a una presión parcial muy baja, por lo que el oxígeno disponible para la vida acuática escasea. La rana gigante del Titicaca aumenta el rendimiento del intercambio gaseoso incrementando el área de piel por medio de pronunciados pliegues que le dan un aspecto característico, y vascularizando intensamente las capas externas de la piel.

Desde un punto de vista fisiológico, las adaptaciones en la sangre de la rana

gigante del Titica no son menos extensas (Hutchison et al., 1976). El volumen de eritrocitos es el más pequeño reportado para los anfibios (lo que aumenta su relación superficie volumen y por tanto la velocidad de difusión del oxígeno al interior de la célula), y el recuento de eritrocitos el más alto. La presión de semi-saturación de la hemoglobina ( $P_{50}$ ) es la más baja medida en un anfibio (lo que permite la captación de oxígeno a las presiones parciales más bajas presentes en el lago). Estas adaptaciones resultan en que la capacidad de  $O_2$  de la hemoglobina, la concentración de hemoglobina y el hematocrito, medidos en las condiciones físicas del lago, son todos elevados en comparación con la mayoría de los anfibios. Es decir, pese a la precariedad de las condiciones ambientales, la sangre llega a los tejidos con un contenido de oxígeno similar o superior al de otros anfibios. Así, los tejidos que consumen el oxígeno sin participar en el proceso de ventilación no se ven restringidos directamente, haciendo innecesaria su adaptación molecular o fisiológica. En consecuencia, la curva de disociación de  $O_2$  (que tiene que ver con las condiciones que determinan la disponibilidad de oxígeno en los tejidos) es la típica de un anfibio.

Finalmente, desde un punto comportamental y ecofisiológico, la rana gigante del Titicaca no deja de sorprendernos (Hutchison et al., 1976). La rana es capaz de acoplar su tasa metabólica específica (que mide la cantidad de energía que consume un kilogramo de tejido por unidad de tiempo) a las condiciones ecológicas en cada momento. Así, en reposo o en ambientes con poco oxígeno, la tasa metabólica específica es la más baja reportada para un anuro. Más aún, el comportamiento del animal está igualmente acoplado para amortiguar las perturbaciones ambientales sobre el metabolismo. De esta forma, si se impide que la rana suba a la superficie del lago para ventilar sus pequeños pulmones en aguas con poco contenido de oxígeno, las ranas buscan una superficie de sustentación y comienzan a hacer movimientos repetitivos de batido de sus miembros delanteros para generar un flujo que recorre su dorso en sentido posterior, ventilando de esta forma la piel. Si se le permite salir a la superficie, la rana ventilará sus pulmones y aumentará su tasa metabólica. Las restricciones metabólicas se manifiestan de manera natural en su dialéctica informacional, que coordina en el comportamiento de batido el proceso disipativo de batir el agua con la especificación informacional de dicho comportamiento.

La rana del Titicaca muestra con claridad la variedad, intensidad e interrelación de las adaptaciones de un organismo. Explicar los modos de vida de un

organismo supone tener en cuenta la multiplicidad de escalas en las que el sistema es capaz de constituirse en una dialéctica con el entorno. No existen fracturas ni dualidades en el modo de vida de la rana, sino una cooperación de sistemas adaptativos coordinados a lo largo de las etapas de su desarrollo ontogenético desde el dominio de la experiencia unitaria del organismo.

### 1.3 Psicología ecológica

Los sistemas gobernados por una dialéctica disipativa están determinados por el campo de fuerzas que los genera. Por el contrario, los estados futuros de los sistemas gobernados por una dialéctica metabólica no pueden ser deducidos únicamente a partir de leyes físicas, pues las interacciones con el entorno se significan y regulan desde las constricciones impuestas por la estructura metabólica. De manera análoga, cuando la estructura metabólica es lo bastante compleja como para regular su frontera con el entorno y resiliente frente a las perturbaciones de alta energía del entorno, la “dictadura” del metabolismo pasa a un segundo plano, y se constituye un organismo como una unidad “libre” de embarcarse en su propia espiral de interacción con el entorno. Aunque las relaciones de necesidad material y energética derivadas de la regulación homeostática metabólica siguen limitando el espacio de estados del sistema, la evolución del organismo dentro de ese subespacio está especificada por interacciones informacionales del organismo con el entorno. En las interacciones informacionales, la energía en el entorno no tiene un papel causal directo sobre el comportamiento. La energía no es instructiva, sino especificacional, es decir, la distribución de la energía en el ambiente puede especificar unívocamente al organismo las posibilidades de adaptación de su comportamiento, pero son las restricciones intencionales las más relevantes en la aparición de unos u otros comportamientos.

#### 1.3.1 La psicología estructural de la tercera persona

Una psicología construida desde una perspectiva exclusivamente estructural está condenada al solipsismo mecanicista denunciado por Dewey porque pretende explicar estructuralmente el comportamiento de sistemas no determinados por su estructura. En una teoría estructural, los procesos de significación psicológica se consideran internos a la frontera que delimita el sistema, reducibles a los mecanismos que los realizan. Las teorías enactivistas y sensorimotoras caen a



menudo en este error en su revisión contemporánea del concepto de arco reflejo (Mossio y Taborelli, 2008). El problema de la teoría sensorimotora radica en que, al igual que los defensores de la validez del arco reflejo en psicología, describen el entorno a nivel de las posibilidades de interacción de los mecanismos fisiológicos de la sensación y el movimiento, olvidando que el organismo, como un todo, se caracteriza por un tipo cualitativamente distinto de posibilidades de interacción con el entorno. Pese a esto, es importante resaltar la importancia que las teorías enactivistas y sensorimotoras tienen dentro del panorama teórico mecanicista al aportar una perspectiva dialéctica mucho más elaborada de las posibilidades de coordinación de los procesos sensorimotores, más próxima a la visión de una red de procesos constreñidos globalmente que al elementarismo reduccionista del concepto de arco reflejo.

Retomando las ideas de Dewey, las posibilidades de interacción de un organismo se enmarcan en la continuidad significativa, unitaria y orgánica de la experiencia de su entorno. La continuidad de la experiencia psicológica no está dirigida sino sólo constreñida por la fisiología del organismo, y la relevancia de los procesos fisiológicos sólo puede entenderse dentro de la coordinación de la que forman parte. Del mismo modo que la unidad autopoietica es el principio global que organiza la estructura metabólica, la experiencia psicológica de un sujeto organiza globalmente sus procesos fisiológicos en una espiral de regulación más amplia que requiere de nuevos conceptos para su explicación.

### 1.3.2 Naturalizando la psicología de la primera persona: affordances y escala ecológica

Una mosca es mosca cuando está mosqueando. En efecto, cada organismo es en la experiencia unitaria que tiene de su entorno, que le es propia por estar indisolublemente unida a las posibilidades de interacción que permiten su anatomía y fisiología. Esta experiencia unitaria del entorno que caracteriza la significación de cada organismo fue denominada *umwelt* por von Uexküll (Kull, 2001). El enfoque ecológico iniciado por James J. Gibson defiende que es posible un estudio naturalizado del *umwelt* a través de las compatibilidades específicas entre un organismo y su ambiente. La psicología ecológica es una psicología de la primera persona naturalizada, que considera la percepción como un logro del individuo que le permite mantener contacto directo con el mundo:

Percibir es un logro del individuo, no una aparición en el teatro de la mente. Es mantenerse en contacto con el mundo, una vivencia de las cosas en lugar de una posesión de experiencias. Implica percatarse-de en lugar de sólo percatarse. Puede ser un conocimiento de algo en el ambiente o algo en el observador o ambos a la vez, pero no hay contenido de la conciencia independiente de aquello de lo que uno es consciente. (Gibson, 1979, p. 239).

Para llevar a cabo esta psicología de las compatibilidades entre el organismo y su entorno, el enfoque ecológico rompe con las tradicionales dicotomías dualistas de sujeto-objeto, mente-cuerpo o agente-entorno, y en su lugar propone un nuevo tipo de dicotomías duales, a la vez subjetivas y objetivas, mentales y corporales, ya que se producen en la síntesis dialéctica del organismo y su ambiente:

Una affordance no es una propiedad objetiva ni una propiedad subjetiva, o es ambos si se prefiere. Una affordance corta a través de la dicotomía sujeto-objeto y nos ayuda a comprender su insuficiencia. Es igualmente un hecho del medio ambiente y un hecho de la conducta. Es a la vez físico y psíquico y, sin embargo, ninguno de ellos. Una affordance apunta en ambos sentidos, al medio ambiente y al organismo. (Gibson, 1979, p. 129).

Por tanto, no cabe plantearse un organismo desacoplado de su entorno, pues son dos caras de una misma moneda, dos elementos que se co-determinan y que no pueden separarse. La escala ecológica de análisis es necesaria para entender cómo y porqué la experiencia psicológica coordina procesos en múltiples escalas de la organización biológica. El dominio operacional de un organismo en tanto que unidad es el de la dialéctica informacional, donde reside la causa eficiente que puede cerrar el bucle explicativo de una psicología de la primera persona. En otras palabras, los patrones de comportamiento no pueden explicarse únicamente a través del nivel orgánico, porque las leyes del comportamiento se encuentran en la escala ecológica (Turvey, Shaw, Reed y Mace, 1981).

La psicología ecológica afirma que para comprender los procesos de percepción y acción debemos identificar las propiedades del entorno que son relevantes para el organismo y que definen el objeto de sus procesos psicológicos (Richardson et al., 2008). Para ello, resulta necesaria la elaboración de una ontología del entorno desde la perspectiva del organismo:

Quizás la composición y disposición de las superficies constituyen lo que ofrecen. Si es así, percibir las es percibir lo que ofrecen. Esta es una hipótesis radical, ya que implica que los “valores” y “significados” de las cosas en el ambiente pueden ser percibidos directamente. Por otra parte, explicaría el sentido en que los valores y significados son externos al perceptor. (Gibson, 1979, p. 127).

Como comentaba más arriba, la ontología propuesta por la psicología ecológica es la de las affordances, que significan el entorno en términos de recursos para la acción de los organismos y no en términos proposicionales (Shaw et al., 1994; Shaw y Kinsella-Shaw, 1988; Shaw et al., 1990). Las affordances son propiedades relacionales o disposicionales, es decir, se definen como una complementariedad entre propiedades del organismo y propiedades del entorno. Por ejemplo, para que una superficie posibilite la locomoción, ha de existir una cierta relación entre la presión que ejerce el organismo sobre la superficie de sustentación al moverse, y la rigidez de la superficie a utilizar como soporte. Por lo tanto, una misma superficie permite distintas acciones a distintos organismos, es decir, tiene significados distintos. Así, la superficie del agua es andable por un insecto zapatero (*Gerris lacustris*) pero no por los humanos.

Para un organismo, percibir las posibilidades para la acción que un recurso del entorno permite es percibir lo que esa realidad ambiental significa. Así, las affordances deben ser identificadas con las metas hacia las que se orienta el comportamiento (Turvey, 1992; Shaw et al., 1994; Shaw y Kinsella-Shaw, 1988; Shaw et al., 1990), ya que proporcionan el conjunto de posibles acciones a realizar, lo que equivale al conjunto de posibles estados futuros a disposición del organismo: “Lo que el filósofo llama predicción es lo que yo llamo la percepción de la affordance. Ver a distancia lo que el objeto ofrece al contactarlo es necesario para la preservación del animal. [...] Pero tiene que ser capaz de ver affordances desde lejos. Una regla para el control visual de la locomoción puede ser ésta: muévete para obtener encuentros beneficiosos con los objetos y lugares y para evitar encuentros perjudiciales.” (Gibson, 1979, p. 232).

Las affordances son hechos objetivables en la escala ecológica (en el sentido de compartibles), con relevancia directa para comprender la experiencia significativa que el organismo tiene de su entorno. En otras palabras, las affordances son propiedades ontológicamente reales y científicamente estudiables de la coalición organismo-ambiente (Shaw, Turvey y Mace, 1982). Así, el realismo directo

propuesto por la psicología ecológica afirma que el conocimiento perceptivo no es epistémico sino ontológico: el significado no es una propiedad subjetiva o fenomenal de la mente, ni necesita ser construido, impuesto o computado por procesos mentales. Para un observador externo, la realidad de las affordances de un organismo se manifiesta al observar las propiedades disposicionales mutuamente recíprocas de organismo y ambiente, y comprobar su eficiencia operacional en la adaptación del comportamiento. Para el organismo, la realidad de las affordances se impone a sí misma, como una tautología, pues son la forma en que interactúan significativa y adaptativamente con su entorno.

Así, las affordances son valiosas para el organismo porque permiten la adquisición de recursos para su existencia, bien sea alimentos, protección, reproducción, etc. Por tanto, una mejor detección y aprovechamiento de las affordances por parte de un organismo tiene como consecuencia un mejor aprovechamiento de los recursos ambientales. En este sentido, las capacidades de un organismo para detectar y aprovechar affordances son las unidades de selección evolutiva en las co-adaptaciones comportamentales (Reed, 1996). No me refiero al sinsentido de que las affordances sean caracteres innatos, sino a que hay gran cantidad de relaciones disposicionales que tan sólo requieren para su manifestación de contextos muy comunes en el hábitat de una especie, y por tanto es de esperar que ese tipo de affordances constituya un valor para la gran mayoría de los miembros de la especie (Elman et al., 1996; Gottlieb, 2007; Reed, 1996; Schneirla, 1966).

### 1.3.3 La percepción directa

Para la psicología ecológica, la percepción directa de propiedades relevantes para el organismo es posible gracias a que el entorno presenta un alto grado de estructuración. De esta forma, los patrones de baja energía que afectan a las superficies sensoriales no son ambiguos o ruidosos, sino tan estructurados como los procesos ambientales que los generan (Gibson, 1979). En un ambiente totalmente aleatorio, el comportamiento adaptivo no es posible porque no hay nada a lo que el comportamiento pueda adaptarse (Zenil, Gershenson, Marshall y Rosenblueth, 2012). Sin embargo, la abundancia de constricciones naturales eficientes en la escala ecológica asegura que la estructura de los campos de baja energía en el ambiente puede especificar propiedades ambientales relevantes. Por ejemplo, las leyes de la óptica geométrica aseguran que los estados del campo electromagnético están fuertemente constreñidos y son capaces de especificar estados relevantes

del entorno que el organismo puede detectar. Los patrones energéticos ambientales estructurados por las restricciones que operan en un contexto se denominan variables informacionales de alto orden, en contraposición al elementarismo perceptivo que caracteriza otros paradigmas (Gibson, 1979; Runeson, 1977; Shaw et al., 1982).

El proceso de percepción de directa propuesto por la teoría ecológica consiste en la detección de variables de alto orden que especifican propiedades ambientales relevantes para la elección y el control de la acción (denominados invariantes perceptivos). Este proceso de percepción directa requiere de los sistemas perceptivos que sean dispositivos perceptivos inteligentes (*smart devices*, Runeson, 1977). La organización de un sistema perceptivo inteligente es capaz de hacer resonar (o sintonizar, en terminología ecológica) las contingencias en su organización con las contingencias ambientales. Esta resonancia de contingencias permite a los sistemas perceptivos inteligentes ser sensibles a las relaciones de especificidad útiles en el control de la acción (véase el ejemplo del planímetro polar en el Capítulo 5). El concepto de sistema perceptivo inteligente resalta la capacidad de los organismos para reordenar espontáneamente su estructura orgánica con el fin de acoplarse a la especificidad entre invariantes informacionales y propiedades ambientales. En el Capítulo 4 presento una serie de experimentos donde analizo el aprendizaje perceptivo como el cambio en el uso de variables informacionales de alto orden. Igualmente, en los Capítulos 5 y 6 se presentan ejemplos de variables de alto orden y su papel en el control de comportamientos.

#### 1.3.4 Acción como sinergia autoorganizada bajo el control informacional

Para la psicología ecológica, conocer es un saber-hacer adaptativo, y requiere tanto de la detección de propiedades del entorno, como el control de la acción basado en las propiedades detectadas. Así, percepción y acción son procesos duales, mutuamente constreñidos en un bucle causal circular, pues sirven a un mismo fin: la obtención de un recurso (o la actualización de una *affordance*). El sentido en que se contempla el bucle de percepción-acción no es simplemente que una influye o interactúa con la otra, sino que percepción y acción son entidades del mismo tipo, se constriñen mutua y recíprocamente (Kadar y Kinsella-Shaw, 1994; Richardson et al., 2008; Shaw, 2003; Shaw y Kinsella-Shaw, 1988; Shaw et al., 1982; Turvey

et al., 1978).

Desde la perspectiva ecológica, el control del movimiento biológico es posible gracias a las restricciones que operan en su dominio operacional. Uno de los investigadores pioneros en considerar el movimiento biológico como un proceso de autoorganización bajo restricciones fue Nikolai Bernstein (1967/1996). El trabajo de Bernstein gira en torno a la idea de que el problema fundamental para comprender la organización de las acciones es la coordinación de un gran número de elementos en el sistema locomotor. La autorregulación del sistema de percepción-acción tiene que seleccionar, dentro de las muchas dimensiones del sistema motor, una combinación específica de activaciones de efectores para producir un movimiento deseado. Debido al gran número de dimensiones de los efectores con respecto a la tarea, hay muchas soluciones equivalentes para cada trayectoria deseada. Esta redundancia en los grados de libertad permite la flexibilidad y estabilidad en el funcionamiento del sistema motor. Igualmente, la redundancia facilita el aprendizaje motor, al proporcionar un amplio espacio de posibilidades para explorar bucles de percepción-acción adaptativos.

El enfoque de los sistemas dinámicos y la sinérgica han proporcionado herramientas para estudiar la coordinación del movimiento orgánico como una propiedad emergente en una dialéctica disipativa. En lugar de especificar todos los detalles del movimiento, el control de un sistema complejo implica el establecimiento de un conjunto pequeño de parámetros de control. Una vez establecidos los parámetros de control del sistema disipativo, el movimiento del sistema emerge en interacción con el medio ambiente de acuerdo con las leyes naturales que rigen la dialéctica disipativa. Desde esta perspectiva, la percepción para el control de la acción consiste en la detección de invariantes informacionales que especifiquen los valores de los parámetros de control apropiados para que la acción alcance su objetivo.

La restricción mutua que constituye el bucle percepción-acción puede ser formalizada a través del concepto de control basado en información (Warren, 2006; Jacobs, Vaz y Michaels, 2012). Según este formalismo, la acción es especificada (en un nivel de abstracción apropiado a la descripción de la acción de la que partimos) de manera directa por la información detectada perceptivamente. En una ley de control basada en información se expresa la restricción mutua que define el bucle percepción-acción. Si existe un desajuste en la especificidad del bucle percepción-acción, procesos en escalas temporales más largas se encargan

de restaurarla de manera directa sobre la base de información específica para el aprendizaje presente en las consecuencias de nuestras acciones (Jacobs y Michaels, 2007; Jacobs, Silva y Calvo, 2009). En el Capítulo 6 trato detalladamente el concepto ecológico de control basado en información y de aprendizaje directo, así como su aplicación a la robótica. Igualmente, en el Capítulo 5 presento numerosos ejemplos de variables de alto orden útiles en el control de actividades deportivas.

### 1.3.5 Resumen: Comportamiento como especificidad ecológica multi-escala

Para la psicología ecológica, el comportamiento es un conjunto de procesos de adaptación del organismo que ocurren simultáneamente a múltiples escalas: percepción y acción, calibración, aprendizaje, intención, desarrollo. La existencia de estas adaptaciones comportamentales se fundamenta en el mantenimiento de las especificidades que permiten explotar los recursos que se dan en cada escala de la coalición organismo-ambiente. Mantener la especificidad en el ámbito ecológico significa mantener la legalidad de la conducta o, en otras palabras, que el organismo se adapta comportamentalmente a su ambiente. Así, la invarianza que le interesa a la psicología ecológica no es la de la organización autopoietica (una condición necesaria pero no suficiente), sino la de las especificidades de la coalición organismo-ambiente que permiten un comportamiento adaptado. La dinámica estructural de los organismos no implementa una forma de representar los objetivos y los caminos para alcanzarlos, sino las organizaciones específicas de los procesos de detección y control para lograr un objetivo especificado intencionalmente en el dominio de la experiencia.

## 1.4 Resumen de los capítulos

El objetivo de los trabajos presentados en esta tesis es mostrar que una perspectiva ecológica y dinámica puede dar cuenta de los procesos de adaptación comportamental. Como hemos visto, el enfoque ecológico y dinámico concibe la experiencia psicológica desde una perspectiva materialista, sin reducirla a los mecanismos fisiológicos sobre los que se sustenta, y rechazando las explicaciones que conciben la significatividad de la experiencia como un dominio de operación independiente de su implementación material. El tipo de explicaciones que pro-

pone el enfoque ecológico y dinámico consideran que la adaptatividad de los procesos comportamentales consiste en el mantenimiento de la especificidad operacional a múltiples escalas. Así, la especificidad entre organismo y ambiente se sustenta en la determinación recíproca, dialéctica, en la que ambos se constituyen.

En la actualidad, el enfoque representacionista domina las interpretaciones del comportamiento que se hacen desde las ciencias cognitivas y la inteligencia artificial. En los trabajos experimentales que componen esta tesis propongo explicaciones alternativas a tareas clásicas del cognitivismo desde el enfoque ecológico y dinámico presentado en esta introducción. Para ello, he elegido un conjunto de tareas experimentales que se consideran paradigmáticas dentro del cognitivismo, y que abarcan “facultades psicológicas” fundamentales reconocidas por el cognitivismo: percepción y acción como facultades de “bajo nivel”, y atención y aprendizaje como facultades de “alto nivel”. La tesis general que defenderé en cada caso es que tanto la distinción entre niveles bajos y altos, como la fragmentación de la adaptación comportamental en facultades mentales inconmensurables que se conectan a través de interfaces simbólicos (a través de estados representacionales) son distinciones espurias. Al contrario, desde una perspectiva ecológica y dinámica, los procesos de adaptación comportamental son efectivos porque se definen en la mutualidad recíproca y con el entorno en el que se desarrolla el comportamiento. Para distinguir funcionalmente entre los distintos procesos de adaptación comportamental debemos tener en cuenta las escalas espacio-temporales en las que cada proceso opera constituyendo un nuevo espacio de interacción y especificidad con el entorno para el organismo. Estas escalas anidadas no son independientes, sino mutuamente interdependientes: las relaciones de especificidad de las adaptaciones comportamentales en las escalas más largas tienen como objetivo el mantener la especificidad en las adaptaciones comportamentales de las escalas más cortas.

Como decía, para contrastar nuestro enfoque con el enfoque dominante hemos elegido tareas experimentales paradigmáticas dentro del cognitivismo. Estas tareas fueron diseñadas dentro del cognitivismo para demostrar la aplicabilidad del enfoque. Por esto, las configuraciones experimentales que proponen, los comportamientos que solicitan a los participantes y las magnitudes que se consideran como representativas, distan en general de las que caracterizan a un enfoque ecológico y dinámico. Pese a esto, los patrones y procesos que observan no dejan de estar dentro del ámbito del comportamiento. Por tanto, son fenómenos que necesariamente han de ser explicados desde paradigmas alternativos, aunque



para restaurar el sentido psicológico de algunas tareas cognitivistas sea necesario redescubrir la tarea en términos más apropiados. A continuación, resumo las tareas estudiadas en cada capítulo y la forma en que planteamos una explicación ecológica y dinámica.

En el Capítulo 2, consideramos el fenómeno de inhibición de retorno (IOR), descrito por primera vez por Posner y Cohen (1984) en tareas diseñadas para analizar el comportamiento de orientación espacial por medio de técnicas de cronometría mental. El paradigma experimental utilizado en la tarea de IOR es un experimento de señalización exógena, en la que un estímulo periférico y espacialmente no informativo (es decir, la señal), precede a la presentación de un estímulo que requiere la detección, la identificación o la discriminación (es decir, el objetivo). La señal puede ser cualquier tipo de evento saliente (por ejemplo, la aparición de un nuevo objeto) que, de acuerdo a la interpretación cognitivista, captura el foco atencional. Como consecuencia de esta captura, las respuestas a los objetivos son más rápidas con señales informativas (es decir, aquellas cuyos objetivos ocupan la posición que antes ocupaba la señal) que con señales no informativas (es decir, aquellas en las que los objetivos aparecen en una nueva ubicación) cuando la asincronía señal-objetivo (es decir, el intervalo de tiempo entre el inicio de la señal y el objetivo, CTOA por sus siglas en inglés) es inferior a 250 ms. Este efecto temprano facilitador de la señal se ha atribuido al costo de tener que reorientar la atención lejos del lugar donde apareció la señal no informativa. Posner y Cohen descubrieron que cuando el CTOA se incrementa más allá de 250 ms, este efecto de facilitación se invierte y las respuestas a objetivos con señales informativas se vuelven más lentas que las respuestas a objetivos con señales no informativas. Este efecto tardío de la señal se ha llamado inhibición de retorno para sugerir un mecanismo: después de que el foco atencional se ha eliminado de una ubicación, su dinámica intrínseca inhibe su retorno a ese lugar (Posner, Rafal, Choate y Vaughan, 1985). Mediante la supresión de la orientación hacia ubicaciones y objetos previamente inspeccionados, IOR fomenta la orientación hacia objetos novedosos y, en consecuencia, se ha especulado que puede servir como un mecanismo facilitador de la búsqueda de alimento.

Nuestra propuesta para dar cuenta de este fenómeno evita el uso del concepto mentalista y homuncular de foco atencional, y lo sustituye por un proceso dinámico emergente en la coordinación sensorio-motora. Así, en nuestra descripción del fenómeno de IOR, las propiedades dinámicas del comportamiento de orientación

espacial son el resultado de la integración de procesos dinámicos a distintas escalas temporales. Dada la pobreza ecológica de los estímulos empleados y las acciones solicitadas a los participantes (apretar una tecla), la eficiencia ecológica del comportamiento de orientación espacial queda reducida a la diferencia cronométrica en la respuesta a dos condiciones de iluminación distintas de una pantalla negra. Para modelar una tarea de estas características, el ámbito y la resolución de nuestra descripción están necesariamente por debajo de la escala del organismo en su entorno. Así, el formalismo dinámico empleado es la teoría de campos dinámicos (DFT, Erlhagen y Schöner, 2002). Este formalismo generaliza las redes neuronales dinámicas y continuas desligando su descripción del nivel estrictamente neuronal. Es decir, la DFT permite utilizar los patrones espaciales y temporales de las redes neuronales para describir procesos que operan en una escala más amplia que la de los procesos celulares, cuya semántica se refiere a las propiedades ecológicas de la tarea en la que se implica el comportamiento. En nuestro modelo, el fenómeno de IOR es el producto del acoplamiento de tres procesos dinámicos que operan en escalas temporales distintas (sensación, habituación y decisión) pero cuyas interacciones conservan las relaciones métricas del espacio de la tarea en las relaciones métricas de los campos. Sin embargo, la disponibilidad de registros neurofisiológicos del colículo superior de monos realizando la tarea nos permite también comprobar si la dinámica del campo de decisión se corresponde con la dinámica neuronal medida.

En el Capítulo 3, consideramos la dinámica comportamental en respuesta a tareas que imponen un compromiso entre velocidad y precisión. El modelo experimental paradigmático de este tipo de tareas en el cognitivismo es la tarea de Fitts (Fitts, 1954). En esta tarea, el movimiento y sus restricciones de precisión son magnitudes espaciales unidimensionales. Así, el movimiento es definido como la distancia entre la posición real y la posición final ( $D$ ), y la precisión como la anchura máxima tolerada para la posición final ( $W$ ). Inspirado por el teorema de la capacidad informacional de Shannon, Fitts interpreta el acoplamiento sensorio-motor como un canal de información que transforma un flujo continuo de información sensorial en un flujo continuo de información motora. Según Fitts, la limitada capacidad de transmisión de información de tales canales sensorio-motores es responsable del compromiso entre la velocidad y la precisión en las acciones humanas. Fitts propone un índice de dificultad logarítmico (medido en bits) para estimar la cantidad de información transmitida en la ejecución de un

movimiento:  $ID = \log_2 \frac{2D}{W}$ . Fitts pidió a los participantes llevar a cabo movimientos con una sola mano entre dos objetivos separados por una cierta distancia ( $D$ ) y con la misma anchura ( $W$ ). Fitts encontró una relación lineal entre la ID y el tiempo de movimiento en todas las condiciones, hoy conocida comúnmente como la ley de Fitts.

La metáfora que subyace en la propuesta de Fitts considera el control motor como un canal de información que conecta de manera directa sistemas aferentes con sistemas eferentes. Esta metáfora respeta la reciprocidad del bucle-percepción acción, pero asume que el compromiso expresado en la ley de Fitts se debe a las limitaciones de procesamiento de información intrínsecas al organismo. Por el contrario, desde una perspectiva ecológica y dinámica, estas restricciones han de buscarse en la dialéctica entre el organismo y su entorno. Por tanto, el compromiso velocidad-precisión emerge como la dinámica comportamental que permite al organismo adaptarse a las condiciones de su entorno para obtener unas metas definidas desde el proceso de la experiencia. En la interpretación ecológica y dinámica de la tarea de Fitts, el sistema motor auto-organiza una dialéctica disipativa (una sinergia) cuyas propiedades dinámicas se adaptan a las restricciones de la tarea gracias a la especificación informacional de la acción en el dominio de la experiencia. El formalismo que empleo en este trabajo para modelar la dialéctica disipativa es la teoría de osciladores no-lineales. En el experimento que presento, utilizo una tarea inédita que me permite evaluar la validez de los osciladores no-lineales como hipótesis para explicar el compromiso velocidad-precisión. La tarea consiste en la coordinación de dos tareas de Fitts continuas simultáneamente con los dos brazos, bajo instrucciones experimentales que enfatizan distintas intensidades de acoplamiento entre las oscilaciones de los brazos. Estas manipulaciones experimentales me permiten verificar la consistencia de la interpretación ecológica y dinámica.

En el Capítulo 4, considero el fenómeno de aprendizaje perceptivo en una tarea de estimación de longitudes en la ilusión visual de Müller-Lyer. La existencia de ilusiones perceptivas ha sido considerada tradicionalmente como un problema fundamental para la consistencia del enfoque ecológico. Sin embargo, en el enfoque ecológico se considera que lo característico de las ilusiones perceptivas es que la especificidad informacional está limitada debido a la simplificación de las restricciones naturales que organizan la energía en el ambiente. En la medida en que existan esas restricciones, el proceso de aprendizaje ha de ser capaz de de-

splazar la atención de los participantes hacia los invariantes informacionales que generan las restricciones. En los experimentos presentados en este trabajo, los participantes reciben un feedback modificado para especificar distintas funciones de utilidad de las variables informacionales presentes en la estructura visual de la ilusión. El objetivo de esta manipulación es conseguir que los sujetos aprendan a detectar los invariantes especificados por el feedback para confirmar la explicación ecológica de las ilusiones perceptivas. De igual manera, esta tarea experimental me permite contrastar las predicciones de las teorías del aprendizaje directo y basado en potencial. El aprendizaje directo es la teoría ecológica del aprendizaje, y como tal se asienta sobre la existencia de información que especifica el aprendizaje en las consecuencias de nuestras acciones. Por esto, aprender es un proceso directo de detección de información de alto nivel que especifica la magnitud y sentido del aprendizaje sin requerir procesos inferenciales. Por otro lado, la teoría del aprendizaje basado en potencial es una teoría indirecta del aprendizaje que requiere de procesos inferenciales y del acceso epistémico al estado funcional del sistema.

En los Capítulos 5 y 6 discuto la utilidad del enfoque ecológico y sistémico en los ámbitos de la psicología del deporte y de la robótica a través de una revisión de los principales desarrollos del enfoque en estas disciplinas. Los dos ámbitos tienen características específicas que los convierten en buenos candidatos para aplicar el enfoque ecológico dinámico. Por un lado, la psicología deportiva se preocupa por actividades humanas que requieren el desarrollo de comportamientos en condiciones extremas de restricción espacial, temporal o energética, en los que los procesos inferenciales pasan a un segundo plano, y el acoplamiento entre percepción y acción se convierte en esencial para el comportamiento adaptativo. Por otro lado, la robótica (especialmente, ciertos tipos de robótica orientadas a la acción) se ocupa del diseño de sistemas artificiales adaptativos. Una robótica comportamental construida entorno a un concepto de adaptación ecológico y dinámico puede abandonar la búsqueda de complejos algoritmos de regulación central y centrarse en explotar la especificidad del ambiente para regular el comportamiento de manera directa.

---

## Chapter 2

# Attention as a Dynamical System

Inhibition of Return (IOR) is one of the most consistent and widely studied effects in experimental psychology. The effect refers to a delayed response to visual stimuli in a cued location after initial priming at that location. This article presents a dynamic field model for IOR. The model describes the evolution of three coupled activation fields. The decision field, inspired by the intermediate layer of the superior colliculus, receives endogenous input and input from a sensory field. The sensory field, inspired by earlier sensory processing, receives exogenous input. Habituation of the sensory field is implemented by a reciprocal coupling with a third field, the habituation field. The model generates IOR because, due to the habituation of the sensory field, the decision field receives a reduced target-induced input in cue-target-compatible situations. The model is consistent with single-unit recordings of neurons of monkeys that perform IOR tasks. Such recordings have revealed that IOR phenomena parallel the activity of neurons in the intermediate layer of the superior colliculus and that neurons in this layer receive reduced input in cue-target-compatible situations. The model is also consistent with behavioral data concerning temporal expectancy effects. In a discussion, the multi-layer dynamic field account of IOR is used to illustrate the broader view that behavior consists of a tuning of the organism to the environment that continuously and concurrently takes place at different spatiotemporal scales.

## 2.1 Introduction

Inhibition of Return (IOR) is a phenomenon related to spatial orientation behavior. The phenomenon consists of an increase in Response Time (RT) for targets appearing at a peripheral location after spatially informative cues, as compared to targets appearing after uninformative cues. The inhibitory effect is observed if the Cue-Target Onset Asynchrony (CTOA) is longer than a certain task-dependent value. For shorter CTOAs priming occurs: Cued targets lead to faster responses than uncued ones. Since Posner and Cohen's foundational work (Posner & Cohen, 1984), IOR has been investigated with a wide variety of experimental procedures, leading to a substantial body of knowledge about the circumstances under which the effect occurs (see Berlucchi, 2006; Klein, 2000; and Lupiáñez, Klein, & Bartolomeo, 2006, for reviews). IOR has been related to sensorimotor interactions in the oculomotor system. The aim of our modeling efforts is to precisely formalize a sensorimotor hypothesis. To describe the motivation for the model in more detail we briefly review the evidence that relates IOR to the oculomotor system.

A first line of evidence that relates IOR to the oculomotor system is provided by clinical studies. One of the main neurophysiological structures of the saccadic control system is the superior colliculus. Patients with midbrain degeneration due to progressive supranuclear palsy, who can be assumed to have the superior colliculus affected, show abnormal RTs in IOR tasks (Posner, Rafal, & Choate, 1985). On the contrary, IOR is preserved in patients with hemianopsia, for who the retinotectal system—which includes the superior colliculus—is intact (Danziger, Fendrich, & Rafal, 1997). Relatedly, IOR is observed in studies with newborns, whose vision is predominantly mediated by the retinotectal system (Valenza, Simion, & Umiltá, 1995). To summarize, these clinical studies indicate that IOR is observed for individuals with an intact superior colliculus, but not for individuals with a damaged superior colliculus, hence providing evidence for the implication of the superior colliculus in IOR.

More direct evidence is provided by single-unit recordings in the superior colliculus of monkeys (Bell, Fecteau, & Munoz, 2004; Dorris, Klein, Everling, & Munoz, 2002; Fecteau, Bell, & Munoz, 2004; Fecteau & Munoz, 2005). The saccadic behavior of monkeys in IOR tasks is qualitatively similar to the behavior of humans, with early facilitation and late inhibition at cued locations. This behavior is paralleled by the activity of visuomotor neurons in the intermediate layer of the superior colliculus. The effect of the target, measured as the difference

between the activity of the neurons before and after the presentation of the target, is consistently depressed in cue-target-compatible stimulations, even at the shortest CTOAs. This depression does not lead to IOR at short CTOAs because the cue increases the pretarget activity. The cue-induced pretarget activity adds to the target-induced increase in activity, overcompensating the depressing effect of the cue and hence resulting in a faster response. IOR is observed at longer CTOAs because the increase in pretarget activity caused by the cue decays more quickly than the depressing effect of the cue.

Neurons in the intermediate layer of the superior colliculus are not less sensitive to electrical stimulation in cue-target-compatible situations (Dorris et al., 2002). This indicates that the depression of the effect of the target in cue-target-compatible situations is due to the fact that the intermediate layer of the superior colliculus receives less intense stimulation, and thus that factors that contribute to IOR are located earlier in the sensory stream. Fecteau and Munoz analyzed the activity of visual neurons located in the superficial layer of the superior colliculus (Fecteau & Munoz, 2005). The activity of these neurons is indeed depressed in the cue-target-compatible situations, supporting the view that IOR reflects a habituated response in earlier sensory areas.

The above-mentioned neurophysiological studies were used by Dukewich as support for her reconceptualization of IOR (Dukewich, 2009). Dukewich's work is based on the concept of orienting response, which is traditionally used to describe the orienting of the sensory organs toward novel events in the environment. Examples of such events are the cues and targets in IOR experiments. It is well known that the strength of the orienting response decreases with the repeated presentation of stimuli. In other words, the orienting response shows habituation. Dukewich's portrayal of IOR is as follows: A spatially informative cue leads to habituation of the orienting response, causing a slower reaction to targets that are presented at the same location as the cue.

In sum, the available evidence indicates that IOR is related to oculomotor interactions in the superior colliculus and to earlier sensory habituation. Our multi-layer model for IOR is inspired by this evidence. In line with the portrayal of Dukewich (Dukewich, 2009), the model relies on the concept of habituation, and in line with single-unit recordings (Bell et al., 2004; Dorris et al., 2002; Fecteau et al., 2004; Fecteau & Munoz, 2005), the habituation is included in one of the layers of the model (the sensory layer) but not in another layer (the

decision layer). More broadly, we developed the model inspired by the view that behavior consists of a multi-scale tuning of the organism to the environment—an issue that is addressed in more detail in the Discussion.

## 2.2 Modeling

### 2.2.1 Dynamic field models and IOR

Sensorimotor accounts of IOR hold that the inhibitory effect emerges from complex interactions in the oculomotor system. Dynamical models provide useful conceptual insights and mathematical tools to study such interactions, because these models allow one to quantitatively and qualitatively inspect the spatiotemporal evolution of the interactions and to propose concrete and falsifiable hypotheses. The specific dynamic modeling approach that we use in this study is referred to as *dynamic field approach* (Erlhagen & Schöner, 2002).

The starting point of a dynamic field model is a continuous space that is in many cases hypothesized to correspond to a spatially organized map in a specific brain area. Two closely related functions are defined on the space: A first function describes the internal activation of loci in the space, referred to as neurons, and a second function describes the external activation, or firing rate, of the neurons. The goal of the modeling is to describe how these activation functions evolve over time. Factors that contribute to the evolution are: (1) spontaneous decay of the activation, (2) lateral interaction among loci in the continuous space, and (3) input from other brain regions. The input from other brain regions is usually divided in exogenous and endogenous input to indicate their relative proximity to sensory surfaces. A precise description of each of these factors results in a system of integro-differential equations that is solved numerically so as to determine the behavior of the system.

A dynamic field model for IOR that is closely related to ours has recently been reported by Satel and colleagues (Satel, Wang, Trappenberg, & Klein, 2011). The model of these authors consists of a single layer and the model assumes habituation (as observed in Fecteau & Munoz, 2005) as an *ad hoc* modification of the sensory input. The main contribution of our model beyond the one presented by Satel and colleagues is that our model consists of multiple layers (cf. Ibáñez, Travieso, & Jacobs, 2010). Multi-layer models allow one to explain phenomena



that arise from the interaction of processes with different time-scales. In our view IOR is such a phenomenon because it arises from the fact that the decay of the cue-induced pretarget activity is quicker than the decay of the cue-induced depression of the effect of the target. An additional contribution of our model is that it includes a dynamic account of habituation.

### 2.2.2 Model equations

Figure 2.1 presents a schematic diagram of the interactions within our model, using the fields obtained in a sample simulation. We next describe these interactions in more detail. The internal and external activation of the *decision field* are denoted as  $D(x, t)$  and  $a_D(x, t)$ , respectively, with  $x$  and  $t$  indicating the spatial and temporal dimensions. The decision field implements accumulating evidence for a motor decision. A decision is triggered when the external activation reaches the threshold of 80% of the maximal activation. The decision field is inspired by the intermediate layer of the superior colliculus and does not suffer habituation; rather, in cue-target-compatible situations the field receives reduced sensory input. The reduced input comes from the second field, the *sensory field*, which is assumed to reflect earlier sensory processes. The internal and external activation of the sensory field are denoted as  $S(x, t)$  and  $a_S(x, t)$ . The sensory field suffers habituation, meaning that with a sustained activation of the field the same internal activation comes to lead to less and less intense external activation. The habituation of the sensory field is implemented with a third field, the *habituation field*, denoted as  $H(x, t)$ .

The equations of our model are closely related to the ones in previous dynamic field models (Erlhagen & Schöner, 2002; Satel et al., 2011; Trappenberg, Dorris, Munoz, & Klein, 2001). The evolution of  $D(x, t)$ ,  $S(x, t)$ , and  $H(x, t)$  is described by:

$$\tau_D \cdot \dot{D}(x, t) = -D(x, t) + h_D + C_{D \rightarrow D}(x, t) + C_{S \rightarrow D}(x, t) + I_{endo}(x, t) \quad (2.1)$$

$$\tau_S \cdot \dot{S}(x, t) = -S(x, t) + h_S + I_{exo}(x, t) \quad (2.2)$$

$$\tau_H \cdot \dot{H}(x, t) = -H(x, t) + h_H + k_H \cdot a_S(x, t) \quad (2.3)$$

The constants  $\tau_D = .328 \text{ s}^{-1}$ ,  $\tau_S = .048 \text{ s}^{-1}$ , and  $\tau_H = 1.620 \text{ s}^{-1}$  encode the relative timing of the processes: The higher a  $\tau$ , the lower the temporal derivative that it multiplies, and, as a consequence, the slower the process. The constants that

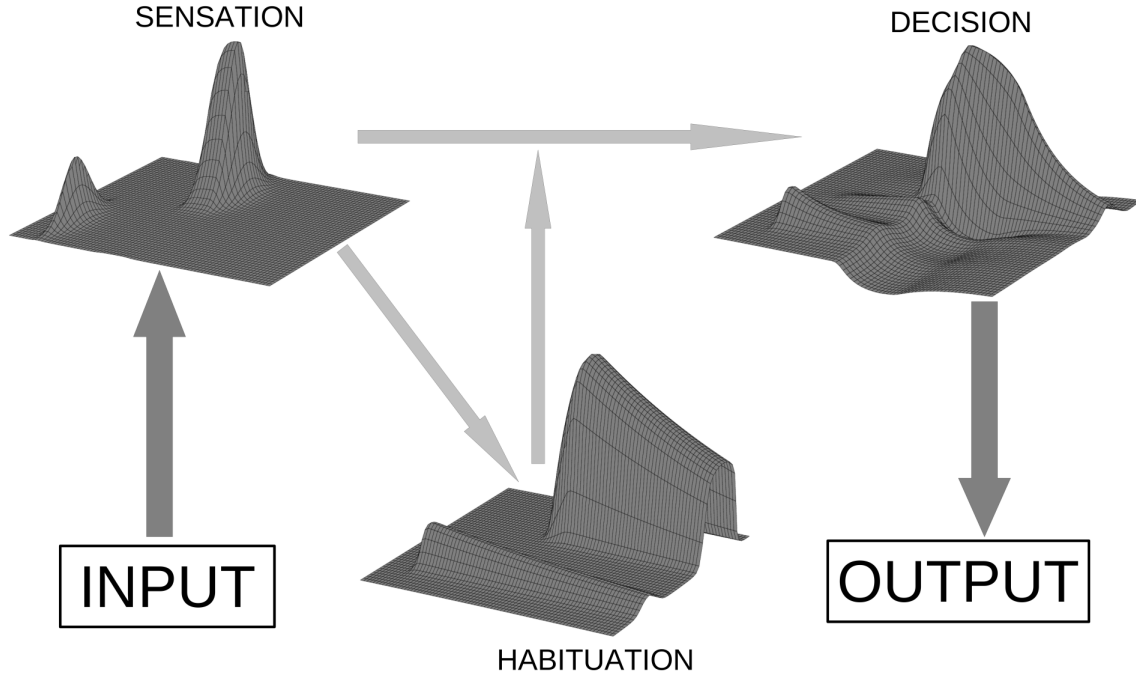


FIGURE 2.1 Schematic representation of the structure of the model. Input into the model is received by a sensation field, which is mutually coupled to an activation-dependent habituation field. The decision field receives input from the sensation field and triggers a response upon reaching a threshold. Time and space are represented by left-right and in-depth dimensions, respectively.

we used were chosen so as to optimize the fit with data reported by Posner and Cohen (Posner & Cohen, 1984).

The first two terms on the right-hand sides of Equations 1 to 3 determine the decay of the fields to their resting levels. The used resting levels were:  $h_D = -30$ ,  $h_S = -1$ , and  $h_H = 0$ . The remaining terms in the equations are described in sequential order, starting with the connectivity terms,  $C_{D \rightarrow D}(x, t)$  and  $C_{S \rightarrow D}(x, t)$ , and proceeding with the endogenous and exogenous input terms,  $I_{endo}(x, t)$  and  $I_{exo}(x, t)$ . However, because the connectivity terms are defined with the external activation functions, we first describe these activation functions and their relation to the habituation.

Remember that  $D(x, t)$  and  $S(x, t)$  represent the internal activation of the fields, or, more precisely, the internal activation of the neurons, or  $x$ -loci, of the fields. The internal activation is related to the external activation, or spike rate,

through the equations:

$$a_D(x, t) = \frac{1}{1 + e^{-\beta_D(D(x, t) - D_0)}} \quad (2.4)$$

$$a_S(x, t) = \frac{1 - H(x, t)}{1 + e^{-\beta_S(S(x, t) - S_0)}} \quad (2.5)$$

where the constants are  $\beta_D=1.4$ ,  $\beta_S=6$ ,  $D_0=0$ , and  $S_0=0$ . These functions are sigmoids with slope parameters  $\beta_D$  and  $\beta_S$ . If the slopes are high, then the internal activation is transformed into an approximately bistable system that is either close to 1 or close to 0, to be interpreted as a neuron that either spikes or does not spike.

Equation 2.5 includes the habituation. With our parameter settings the habituation always remains between 0 and 1. No habituation occurs with  $H(x, t)=0$ , in which case the maximum achievable spike rate is 1. The more  $H(x, t)$  approaches the value of 1, the lower the maximum achievable spike rate. Reciprocally, the habituation  $H(x, t)$  depends on the activation  $a_S(x, t)$ , as defined in Equation 2.3. The habituation increases when the sensory field is spiking. To implement the behaviorally observed asymmetry in habituation, with a relatively fast build-up and a slow decay, we used  $k_H=7$ . A similar way to implement activation-dependent habituation can be found in the work of Tabak, Senn, O'Donovan, & Rinzel (2000). Having defined Equations 2.4 and 2.5 we are now in the position to address the connectivity terms.

The term  $C_{D \rightarrow D}(x, t)$  in Equation 2.1 represents the overall excitation or inhibition received by a neuron in the decision field from other neurons in the decision field. This is referred to as lateral interaction. The lateral interaction is given by a convolution:

$$C_{D \rightarrow D}(x, t) = \int W(x - x') \cdot a_D(x', t) dx' \quad (2.6)$$

$$W(d) = a \cdot e^{-\frac{d^2}{2\sigma_a^2}} - b \cdot e^{-\frac{d^2}{2\sigma_b^2}} - c \quad (2.7)$$

where  $a=11$ ,  $b=4.5$ ,  $c=1$ ,  $\sigma_a=4$ , and  $\sigma_b=7$ . The function  $W(d)$  encodes the connectivity among neurons in the decision field. Following Trappenberg et al. (2001), we used a Mexican hat pattern defined with a double Gaussian function, which depends only on the distance between the neurons. The Mexican hat operator implements excitation for near loci and inhibition for distant loci.

For the influence of the sensory field on the decision field we used a 1-to-1 projection:

$$C_{S \rightarrow D}(x, t) = w_{S \rightarrow D} \cdot a_S(x, t)$$

in which  $w_{S \rightarrow D} = 95$ . We now turn to the encoding of the input, again largely following previous work (Erlhagen & Schöner, 2002; Satel et al., 2011; Trappenberg et al., 2001).

Stimuli were encoded as Gaussian distributions of excitation. Exogenous stimuli decayed. This decay models the fact that exogenous stimuli affect the sensory field mainly when they appear. The equations of the stimuli, or input, are:

$$I_{exo}(x, \tau) = I_{max} \cdot e^{-\beta_{stim} \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{(x-l)^2}{2\sigma_{stim}^2}} \quad (2.8)$$

$$I_{endo}(x) = I_{max} \cdot e^{-\frac{(x-l)^2}{2\sigma_{stim}^2}} \quad (2.9)$$

The location  $l$  corresponds to the center of the input and  $\tau$  gives the time since the stimulus onset. The used value of the decay parameter was  $\beta_{stim} = 0.07 \text{ s}^{-1}$ . Exogenous input was included for cues ( $I_{max} = 40$ ;  $\sigma_{stim} = 8$ ) and targets ( $I_{max} = 60$ ;  $\sigma_{stim} = 8$ ). The duration of the cues was 50 ms. Targets lasted until the model reached the response threshold. A small endogenous preactivation, constant over time, was included at the fixation point ( $I_{max} = 10$ ;  $\sigma_{stim} = 4$ ). The widths of the input distributions are given in units that correspond to the distance between successive neurons in our numerical approximations.

A final endogenous effect included in the model concerns the expectation or foreperiod effect (Klein & Kerr, 1974). In typical IOR tasks, cues are either informative or not informative about the spatial properties of the target, but they are always informative about the temporal properties of the target. That is, a target usually appears a certain time-interval after the cue, even though the length of that time interval may vary. This means that the conditional probability that a target appears, given that it has not appeared yet, increases during the interval after the cue in which the target may appear. Experimentally observed RTs parallel this increase in probability: the longer after the cue the target appears, the shorter the RT. To model this expectation effect we included endogenous signals ( $\sigma_{stim} = 8$ ) at each of the possible locations of the target (cf. Satel et al.,

2011). The  $I_{max}$  of these signals increased over time:

$$I_{max}(\tau) = m \cdot \tau + I_0 \quad (2.10)$$

where  $m=50 \text{ s}^{-1}$  and  $I_0=18$ .

Following previous work (Satel et al., 2011), perceptual delays were used to represent the time needed for the input to reach the respective fields. For exogenous input the delay was 70 ms and for endogenous input the delay was 120 ms. A motor delay of 80 ms was used to represent the time between a decision (i.e.,  $a_D[x, t]$  reaching threshold) and the registration of a response.

Dynamic fields can show different types of attractors. A first type of attractor consists of a region with a high level of activation that sustains itself with nearby excitation of the loci in the region, while the activation of the rest of the field is depressed with long-range inhibition. A more trivial attractor occurs when all neurons approximate the resting level. With our parameter settings the self-sustained type of attractors did not occur. This means that the model operated in the input-driven regime: In the absence of input the fields decayed toward their respective resting levels (as can be seen in Figure 2.1).

## 2.3 Methods

Parameters were optimized with data estimated from Figure 32.2 of the influential chapter by Posner and Cohen (1984). In the considered experiment, the outlines of three squares appeared at the start of each trial. Cues were implemented by the brightening of the outline of the left or right square. Targets were implemented by a smaller square that appeared in one of the outlines. The task consisted in responding with a manual keystroke to the target. Instructions were to move as fast as possible while fixating the center square. Six CTOAs were used: 0, 50, 100, 200, 300, and 500 ms.

To numerically simulate the behavior of the coupled fields we considered 100 equidistant nodes, or neurons, per dynamic field. We used two exogenous signals: one each for cue and target, centered at Node 25 or Node 75. Catch trials at which the target appeared at Node 50 were not included in the analyses. Endogenous expectation signals were used at each position at which a target could appear in the experiment: Nodes 25, 50, and 75. An additional endogenous signal at Node

50 represented the fixation instruction.

The differential system that defines the model is well behaved with regard to integration techniques (cf. Erlhagen & Schöner, 2002). We therefore used a first-order Euler algorithm for the integration, with a step-size of 5 ms. This is a fast algorithm that requires only the first temporal derivative.

The models were fitted to the experimental data with a deterministic evolutionary algorithm (Vasconcelos, Saldanha, Krähenbühl, & Nicolas, 1997) that optimized the differences in the RTs for cued and uncued trials—which is to say that it optimized the predicted IOR. More precisely, the fitness function,  $F$ , was:

$$F = \frac{100}{1 + RMSE} \quad (2.11)$$

The Root Mean Squared Error (RMSE) in this formula was defined as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (PI_i - OI_i)^2} \quad (2.12)$$

where  $n$  is the used number of CTOAs ( $n=6$ ), the subscript  $i$  indicates a particular CTOA,  $PI_i$  is the inhibition ( $RT_{cued} - RT_{uncued}$ ) predicted by the model for a particular CTOA, and  $OI_i$  is the experimentally observed inhibition for that CTOA. Hence, the lower the differences between the predicted and observed inhibition, the higher the fitness, with the theoretical maximum of the fitness being 100.

The parameters included in the evolutionary optimization were:  $\tau_D$  (ranging from .01 to 1 s<sup>-1</sup>),  $\tau_S$  (ranging from .01 to 1 s<sup>-1</sup>),  $\tau_H$  (ranging from .01 to 2.5 s<sup>-1</sup>),  $w_{S \rightarrow D}$  (ranging from 0 to 100),  $m$  (ranging from 0 to 100), and  $I_0$  (ranging from 0 to 20). The delay parameters were taken from Satel et al. (2011). The remaining parameters were set by hand.

The hardware platform used to perform the simulations was an Intel i7-930 processor with 12 GB of RAM running a Debian GNU/Linux 6.0 environment. All simulations and analyses were performed using Python scripting language, Scipy/Numpy for multidimensional array manipulation, and Matplotlib for plotting. Integration of differential equations was implemented in a self-developed Python C library extension. Genetic algorithm code was also self-developed.

## 2.4 Results

Our main challenge in this research is to explain the basic mechanisms underlying IOR using a multi-scale dynamics paradigm. Simulations were performed to replicate behavioral data, to compare the simulated activation of neurons in the model to measured neurophysiological data, to analyze habituation, and to analyze the expectation effect.

### 2.4.1 Simulating behavioral data

Figure 2.2 shows simulated RT increments plotted against experimental RT increments (estimated from Posner & Cohen, 1984). The increments reflect RTs for uncued trials subtracted from RTs for cued trials, hence providing a measure of IOR. The dots closely approximate the diagonal, indicating that the simulated data closely approximate the experimental data. The achieved fitness value (Equation 2.11) is 99.1. The average absolute difference between simulated and experimental RT increments is 8.0 ms (SD=3.3). Also shown in the figure are the Pearson product-moment correlation between simulated and experimental data ( $r=.95$ ) and the associated significance level ( $p=.004$ ). Model parameters were optimized with the data shown in this figure; all subsequent analyses used the same parameter values.

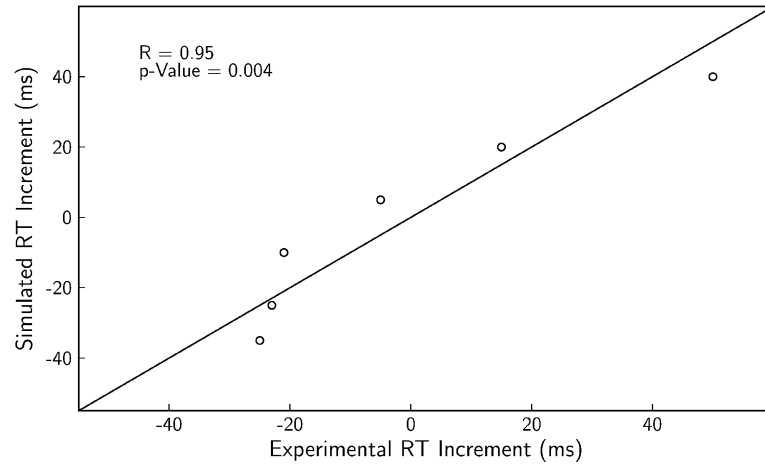


FIGURE 2.2 Comparison of simulated and experimental IOR. RT increments for simulated data plotted against RT increments for experimental data. Each dot reflects a single CTOA. Experimental data were estimated from Figure 32.2 in Posner & Cohen (1984). The figure indicates that the optimization resulted in good fits.

Figure 2.3 provides a more detailed comparison of the experimental and simu-

lated data (upper and lower panel, respectively). Presented are the mean RTs for cued targets (filled dots) and uncued targets (open dots). The average absolute difference between the experimental and simulated data shown in this figure is 23.3 ms (SD=14.6) for the cued trials and 23.0 ms (SD=14.4) for uncued trials. Even though these means per condition were not included in the optimization algorithm, the errors are relatively small, hence indicating that the model reflects the characteristic behavioral features of IOR.

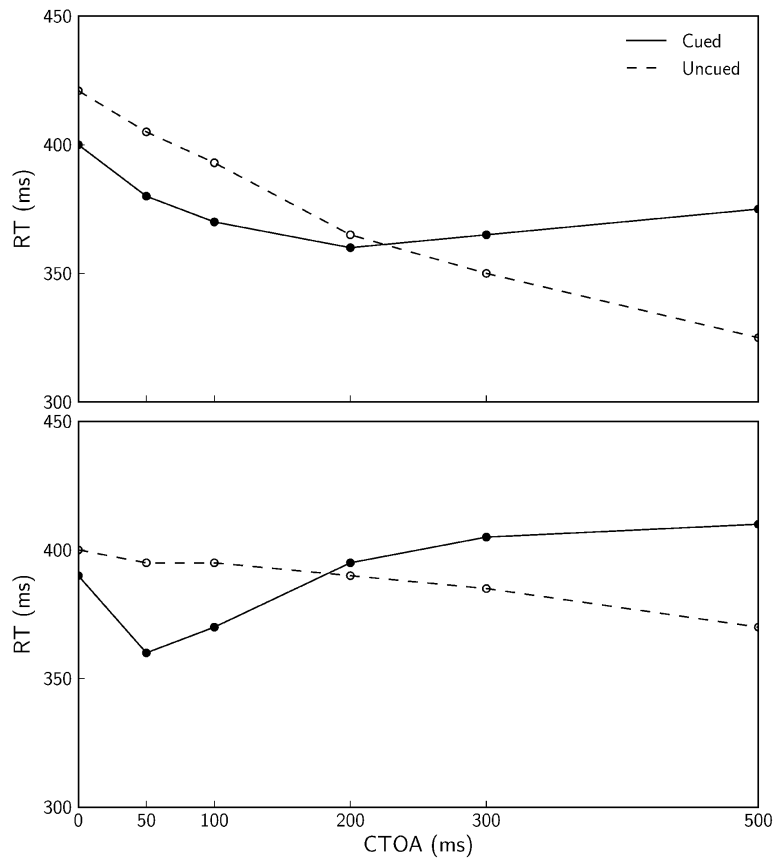


FIGURE 2.3 Mean RTs for experimental and simulated data. Mean RTs are shown for different CTOAs. Upper panel shows behavioral data estimated from Figure 32.2 of Posner & Cohen (1984) and lower panel shows results of our simulations. The figure indicates reasonable fits despite the fact that these means were not included in the optimization algorithm

Better fits were observed for optimizations that excluded the condition  $CTOA=0$ , in which the experimental data show more facilitation (21 ms) than the current simulations (10 ms). In the condition  $CTOA=0$  the cue and target appear at the same moment. The model assumes a linear summation of the inputs of cue and target which, apparently, did not lead to sufficiently pronounced reduc-



tion in RT. Our interpretation of this result is as follows: With the target, the external activation of the sensory field already tends to approach its maximum of 1, reducing the possible facilitatory effect of additional activation caused by the cue. We did not try to achieve *ad hoc* improvements of the model in this regard.

### 2.4.2 Simulating neurophysiological data

To compare our model to neural activation measured with single-unit recordings, and to provide an intuition about the functioning of the model, we next consider the activation of simulated neurons at the  $x$ -locus of the target, referred to as  $x_0$ . Figure 2.4 depicts the temporal evolution of the components of the model under different stimulation conditions. The left part of the figure contains, from top to bottom, the time course of the internal components of the model,  $D(x_0, t)$  and  $S(x_0, t)$ , and the time course of the  $I_{max}$  parameter of the expectation signal. The right part of the figure contains the external activation variables,  $a_D(x_0, t)$  and  $a_S(x_0, t)$ , and the habituation,  $H(x_0, t)$ . All variables are presented for CTOAs of 25, 75, and 500 ms. Solid curves indicate cued targets and dashed curves indicate uncued targets. The timing of the target (T) and the cue (C), taking into account the delay of these signals, is indicated at the bottom of the figures.

The presented CTOAs were chosen to illustrate the possible summations between cue and target. For CTOA=25 ms there is temporal coincidence of cue and target, whereas for CTOA=75 ms there is no temporal coincidence, but there still is summation, for instance in  $S(x_0, t)$ , of the cue-induced and target-induced activation. For CTOA=500 ms, the excitation generated by the cue has dissipated from  $S(x_0, t)$  due to the fast temporal dynamics of the sensory field. Behaviorally, the first two CTOA conditions show facilitation for informative cues and the last CTOA condition shows inhibition. Let us consider the observed dynamics for each stimulation condition in more detail.

In the CTOA=25 ms condition, the coincidence of cue and target produces a higher activation in  $S(x_0, t)$  for cued trials than for uncued trials, but this difference is partially mitigated in  $a_S(x_0, t)$ . The difference in stimulation received by  $D(x_0, t)$  can be measured as the area between the dashed and solid curves in  $a_S(x_0, t)$ , which is small. Differences in RTs were computed as the differences in which *any* locus in the  $a_D(x, t)$  field reached the threshold of .8. These differences, however, are essentially the same as the differences in which the target-aligned curves in the  $a_D(x_0, t)$  plots reach the threshold. The leftmost panel for the

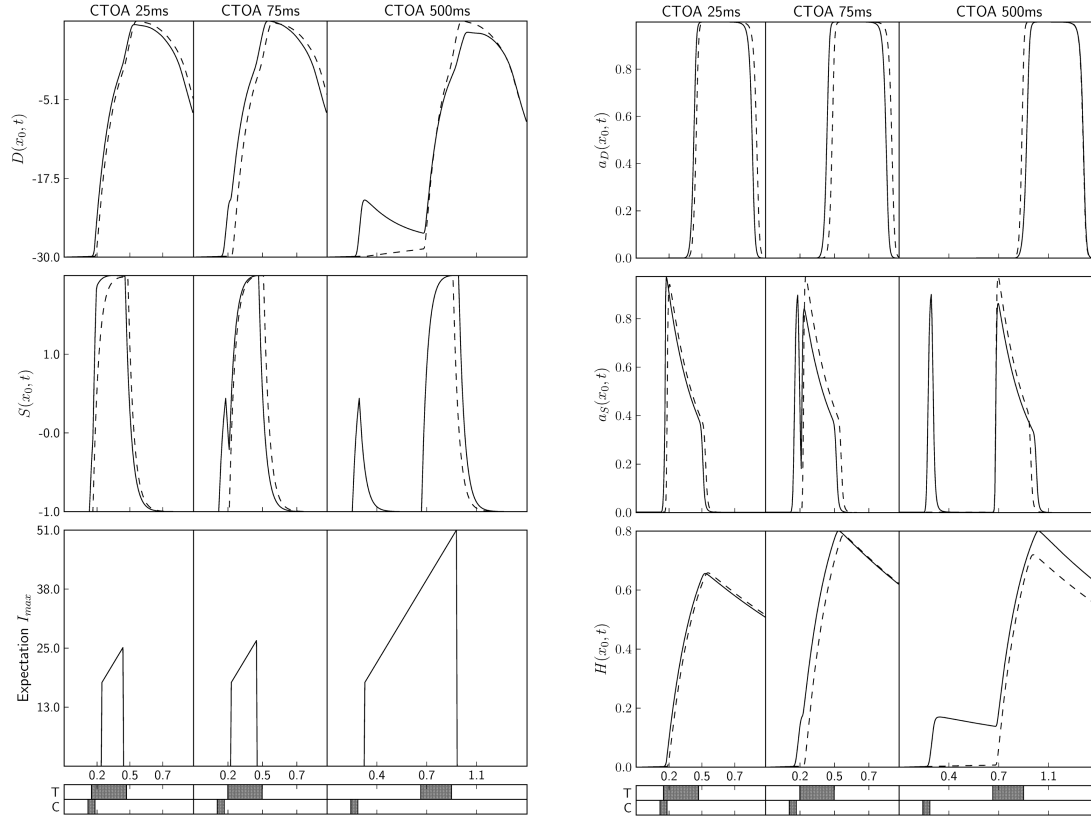


FIGURE 2.4 Component-by-component overview of the functioning of the model. Evolution of  $D(x_0, t)$ ,  $S(x_0, t)$ , and  $I_{max}$  parameter of expectation signal (left panels) and of  $a_D(x_0, t)$ ,  $a_S(x_0, t)$ , and  $H(x_0, t)$  (right panels), as a function of time. All signals are illustrated for representative CTOAs: 25, 75, and 500 ms. The activation for cued trials is indicated with solid curves and the activation for uncued trials with dashed curves. T=timing of the target; C=timing of the cue. The figure provides intuitions about the functioning of the model, most particularly about the interplay of early facilitation and late inhibition. See text for details.

$a_D(x_0, t)$  signal shows that cued trials are faster than the uncued ones, but not much (see also Figure 2.3).

In the CTOA=75 ms condition, the temporal succession of the cue and target determines that the difference in the excitation of  $a_S(x_0, t)$  that is projected to  $D(x_0, t)$  in the cued and uncued conditions is larger than in the CTOA=25 ms condition. The curves  $S(x_0, t)$  and  $a_S(x_0, t)$  now show an almost independent peak of activation for the cue. The peak in  $a_S(x_0, t)$  raises the activation in  $D(x_0, t)$  so that, when the target arrives,  $D(x_0, t)$  already has a substantial activation and  $a_D(x_0, t)$  more easily reaches the threshold. This facilitatory effect goes together with an inhibitory effect. The stronger and earlier habituation in the

cued condition, which can be observed in  $H(x_0, t)$ , leads to a lower target-elicited peak in  $a_S(x_0, t)$ , and hence to a smaller target-elicited effect in  $D(x_0, t)$ . Because in this CTOA condition the facilitatory effect is stronger than the inhibitory effect, we can observe that the continuous curve in  $a_D(x_0, t)$  reaches the threshold sooner than the dashed curve.

In the CTOA=500 ms condition, the temporal interval between cue and target is so large that  $S(x_0, t)$  and  $a_S(x_0, t)$  reach their resting state before target onset. When the target-induced excitation arrives, there is little cue-induced excitation left in  $D(x_0, t)$ . The dominant component of the dynamics, therefore, is the slow temporal evolution of  $H(x_0, t)$ , giving rise to an inhibitory effect. The magnitude of the inhibitory effect can be observed in the difference between the peaks generated by the target in  $a_S(x_0, t)$ . This difference is propagated to  $D(x_0, t)$ , where uncued trials now have a higher target-induced slope, producing a faster RT.

The interplay of the facilitatory and inhibitory effects in the model shows a qualitative resemblance to the activation of visuomotor neurons in the intermediate layer of the superior colliculus. It is illustrative to compare our simulation results to the single-unit recordings of Fecteau and Munoz (2005) and to the schematic portrayal of IOR as the product of habituation by Dukewich (2009). In both examples, facilitation at short CTOAs goes together with the summation of target-induced and cue-induced activation (Figure 2c of Dukewich, 2009; blue line in upper right panel of Figure 3 of Fecteau & Munoz, 2005), and inhibition at longer CTOAs goes together with a reduced target-induced effect and a by then largely decayed cue-induced activation (Figure 2d of Dukewich, 2009; blue lines in lower right panels of Figure 3 of Fecteau & Munoz, 2005).

One cannot expect more than a qualitative similarity between our simulation results and the neurophysiological recordings because the model was optimized for manual RTs of humans and the recordings concerned saccadic responses of monkeys. One of the notable differences between the simulations and the neurophysiological data is that we observed a cue-induced peak of activation in  $D(x_0, t)$ , most clearly in the CTOA=500 ms condition, but not in  $a_D(x_0, t)$ . The field  $a_D(x, t)$ , however, is hypothesized to reflect external activation in the intermediate layer of the superior colliculus, and cue-induced peaks of activation have been measured in this layer (Fecteau & Munoz, 2005). It is possible to make the cue-induced activation more visible in the model component  $a_D(x, t)$ , for instance by setting  $h_D$  in Equation 2.1 closer to 0 or by using a smaller value of  $\beta_D$  in

Equation 2.4.

### 2.4.3 The effect of habituation

The sensorimotor hypothesis affirms that IOR is related to habituation and habituation-induced sensory depression. To inspect the sensory depression in the model, we ran simulations that were identical to the previous ones with the following exceptions: CTOAs were varied from 0 to 4 s in increments of 10 ms, the target lasted 500 ms, and we used  $I_{exo}=60$  for cue and target.

Figure 2.5 shows the maximum height of the target-induced peak in  $a_S(x_0, t)$ , hence illustrating the sensory depression. The curve quickly drops for small CTOAs, reaches a minimum at a CTOA of about 150 ms, and slowly recovers for higher CTOAs. Remember that the habituation in the model is generated dynamically, which is to say that it is fully accounted for by a simple set of equations. Figure 2.5 may be compared to the left side of Figure 4b of Fecteau & Munoz (2005; cf. Figure 1c of Satel et al., 2011). These authors measured the target-induced activity in visual neurons in the superficial layer of the superior colliculus. The simulated curve is similar to the measured one in the sense that it shows a fast initial drop in target-induced activity followed by a gradual increase for longer CTOAs.

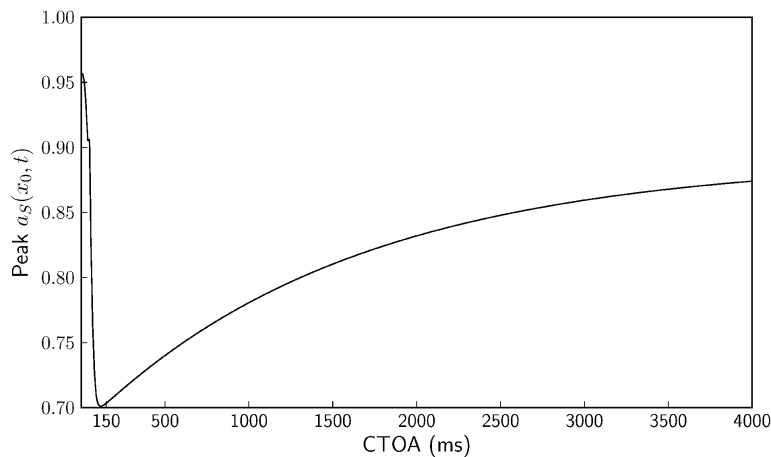


FIGURE 2.5 Habituation curve. Peak value of  $a_S(x_0, t)$  in response to a 500-ms target after a 50-ms cue, as a function of CTOA. The figure indicates a qualitative similarity of our dynamically generated sensory depression to experimentally observed sensory depression (Fecteau & Munoz, 2005)

Let us note once more that the data of Fecteau and Munoz (2005) were mea-

sured for monkeys performing a saccadic reaction task. IOR for saccadic responses of monkeys is typically observed only for CTOAs smaller than 1 s, whereas IOR for manual responses of humans may last as long as 6 s. This difference is reflected in the respective habituation curves: Whereas the curve of Fecteau and Munoz shows a full recovery for CTOAs of about 1 s, our curve shows habituation for CTOAs of up to 4 s.

#### 2.4.4 The effect of temporal expectation

Our model emphasizes sensorimotor contributions to IOR. Even so, the model includes endogenous input for the temporal expectation effect (Equation 2.10; lower panels of left side of Figure 2.4), which can be interpreted as an influence from higher-order processes (Tipper & Kingstone, 2005). To test the importance of this input we performed simulations without it. The mean RTs obtained with these simulations are presented in Figure 2.6. The distance between the curves in the figure indicates that the model without expectation input reproduces IOR. Furthermore, whereas the RTs produced with the expectation input show a tendency to decrease with increasing CTOAs, especially for CTOAs larger than 500 ms (not shown in the figures), without the expectation input the model does not show such a decrease in RTs.

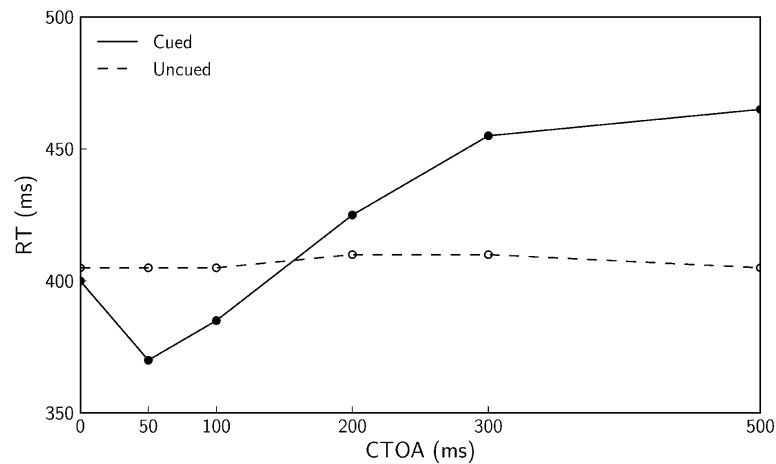


FIGURE 2.6 Simulations without temporal expectation. Simulated RTs for different CTOAs obtained with a model without endogenous expectation-related input. The figure indicates that the characteristic RT increments are observed also for a model without expectation input.

These modeling results can be related to a behavioral study of Tipper and

Kingstone (2005), who performed a manipulation that, according to their interpretation, led participants to rely or not rely on the temporal predictability of cues. The condition with reliance on the temporal predictability replicated the common behavioral characteristics of IOR. In the condition without reliance on the temporal predictability IOR was still observed, but the RTs did not decrease with increasing CTOAs. These observations are consistent with the above-mentioned modeling results. Tipper and Kingstone, however, also reported a decrease in the magnitude of IOR in the condition without reliance on temporal predictability. A comparison of our Figures 2.3 and 2.6 shows that this decrease is not consistent with our results.

## 2.5 Discussion

The activity of visuomotor neurons in the intermediate layer of the superior colliculus is closely related to IOR effects observed with behavioral measures (Dorris et al., 2002) and the activity of these neurons has successfully been modeled with dynamic fields (Trappenberg et al., 2001). This suggests that IOR can also be modeled with dynamic fields. Satel and colleagues (2011) indeed presented a single-layer dynamic field model that explains several IOR-related effects. However, IOR arguably emerges from the interaction of processes with different time-scales: a facilitatory effect of the cue-induced activation that decays quicker than the inhibitory effect of the cue-induced sensory habituation. The interaction of processes with different time-scales invites the use of multi-layer models.

We continued the direction taken by Satel and colleagues (2011) and developed a multi-layer dynamic field model for IOR. Our model includes a dynamic account of sensory habituation. Simulations showed that (a) our model is consistent with behavioral IOR data (Posner & Cohen, 1984), (b) the activation of visuomotor neurons in our model is qualitatively similar to the activity of visuomotor neurons in the intermediate layer of the superior colliculus of monkeys performing IOR tasks (Dorris et al., 2002), (c) the sensory habituation shown by our model is qualitatively similar to the depression of the activity of neurons in the superficial layer of the superior colliculus of monkeys (Fecteau & Munoz, 2005), and (d) our model is consistent with behavioral results regarding temporal expectancy effects (Tipper & Kingstone, 2005).

With our model we aim to contribute to a dynamical-systems description

of behavior as a multi-scale tuning to the environment (Perdikis et al., 2011a; Perdikis et al., 2011b). The shortest time-scale in our model is the one of the sensory field ( $\tau_S=.048 \text{ s}^{-1}$ ), meaning that the sensory field has the highest temporal resolution. One order of magnitude above sensation, the decision field has a lower temporal resolution ( $\tau_D=.328 \text{ s}^{-1}$ ), but it includes lateral interactions (Equations 2.6 and 2.7) that improve the spatial resolution. The decision layer integrates diverse sources of information so as to reach a unique decision. Our model includes a habituation that is one order of magnitude slower ( $\tau_D=1.62 \text{ s}^{-1}$ ) than the decision processes. The habituation layer is reciprocally coupled to the sensory layer (Equations 2.3 and 2.5). The habituation is crucial to the modeling of IOR. Even so, rather than being generated and localized at one of the layers, behavioral effects emerge from interactions among layers.

A tuning of the organism to the environment that occurs at yet longer scales can be referred to as learning. This process may be based on many perception-action cycles (Jacobs, Silva, & Calvo, 2009) and its effects may last for many cycles as well (cf. Ibáñez-Gijón, Travieso, & Jacobs, 2011). Our model does not implement processes at this longer time-scale. Relatedly, rather than a dynamic modeling of the expectation effect, our model assumes an expectation effect (see Equation 8 and the text above that equation). In the simulations the expectation effect is either included (in most cases) or not included (in the simulations concerning the results of Tipper & Kingstone, 2005). To achieve a more encompassing model one could include an additional field, referred to as expectation field, whose activity builds up over trials at locations at which targets are presented, and with projections to the decision field (in analogy to the memory field discussed in Spencer & Schöner, 2006). Including processes with the longer time-scale of expectation may be needed to model empirically observed previous trial and learning effects (Dodd & Pratt, 2007; Fecteau & Munoz, 2003; Weaver, Lupiáñez, & Watson, 1998).

To summarize, we developed a model that implements a multi-scale dynamic field explanation for IOR. Processes with different time-scales continuously and concurrently tune behavior to the environment. The model uses a single language, the language of dynamical systems, to describe informational, physiological, and behavioral quantities. The model combines these heterogeneous mechanisms into a single system composed of coupled state variables, extended over a common spatial metric and evolving in a common temporal dimension. Within such a frame-

work, the behaviorally observed rates of the different phenomena are expressed as the time-scale separation of the dynamics of the different state variables.



---

## Chapter 3

# Action as a Dynamical System

Our everyday life can be regarded as a complex concatenation of events or tasks. For each task, a set of action-goals specify the required action-gaps that we need to fill in order to achieve our overall intentions (Bootsma & Mottet, 2004; Lee, 1998; Shaw & Kinsella-Shaw, 1988; Shaw & Warren, 1985; Warren, 1998). Filling such action-gaps is subject to a multitude of constraints. One of the most fundamental constraints is the popularly acknowledged compromise between speed and accuracy. The speed-accuracy trade-off imposes a reduction of movement speed as precision constraints increase for a certain action-gap (Woodworth, 1899). Within a task composed of a set of action-goals, action-gaps can be serially concatenated or executed in parallel. In the present study, we focus our attention on the constraints to behavioral dynamics and movement control that emerge in an overall task that demands the concurrent and bilateral execution of tasks with symmetric as well as asymmetric speed-accuracy trade-offs.

### 3.1 Introduction

Fitts' influential work (1954) presented a paradigmatic experimental task for the study of the speed-accuracy trade-off in goal-directed actions. The task considers the action-gap and its precision constraints as one-dimensional spatial magnitudes. Fitts' task defines the action-gap as the distance between the actual position and the intended (by instructions) final position ( $D$ ), and the precision constraint as the maximum tolerated width for the intended final position ( $W$ ). Defining those independent task properties along a single dimension facilitates the formulation of a unique dimensionless index of task difficulty. Inspired by Shannon's information capacity theorem, Fitts interpreted sensorimotor coupling as an information channel that transforms a continuous stream of sensory input into a continuous stream of motoric output. According to Fitts, the limited transmission capacity of such sensorimotor channels is responsible for the well-known compromise between speed and accuracy in human actions. Hence, not unlike the formula used by Shannon, he proposed the following expression for the index of difficulty (measured in bits):  $ID = \log_2(2D/W)$ . In the original experiment, participants were asked to perform either reciprocal (Fitts, 1954) or discrete (Fitts & Peterson, 1964) unimanual aiming movements between two targets. Fitts found a linear relationship between  $ID$  and movement time ( $MT$ ) in all conditions. Today, this relationship is commonly known as Fitts' law. According to Fitts, the slope of this linear trend is an estimation of the maximum transmission capacity of the sensorimotor channel (known as index of performance,  $IP$ ).

Despite Fitts' interpretation of perception-action as a continuous and bidirectional stream of information, his research and most of the work on speed-accuracy trade-off from the information processing perspective that followed him reduced the output of the system to a single scalar value:  $MT$  (see MacKenzie, 1992, and Meyer, Abrams, Kornblum, Wright, & Smith, 1988 for revisions of Fitts' task and the speed-accuracy trade-off). The dynamical systems approach to motor control proposed an alternative account of Fitts' task and Fitts' law, relying on the notion of perception-action as continuously and reciprocally constraining processes (Bootsma, Mottet, & Zaal, 2004; Fernandez & Bootsma, 2004; Mottet & Bootsma, 1999). This approach stresses that movement is a continuous time-varying magnitude that gives access to the kinematic and the kinetic unfolding of actions. Therefore, in this approach the reciprocal task is typically preferred over the discrete task because the continuity of movements is not bro-

ken by instruction, but rather by the intrinsic task constraints themselves (if so). The phenomenological perspective advocated by the dynamicists has brought new analytical tools, from (non-linear) dynamical systems theory, to understand the processes underlying behavioral organization (Beek & Turvey, 1992; Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, 1995; Kelso & Schöner, 1987; Kugler & Turvey, 1987; Port & van Gelder, 1995).

A previous round of dynamical models of the unimanual Fitts' task made extensive use of the theory of non-linear oscillators. In particular, Mottet and Bootsma (1999) used Hooke's portraits to estimate the dissipative terms of the non-linear oscillations of hand movements under accuracy and speed constraints. Hooke's portraits describe (oscillatory) systems in the bidimensional space coordinated by their acceleration and position. If the motor system follows a linear trajectory in Hooke's plane, the dynamics are perfectly harmonic and conservative: Energy is non-dissipatively transformed between kinetic and potential throughout the cycle. Non-linear relations between position and acceleration imply an inhomogeneous distribution of energy fluxes across the cycle, that is, energy is subject to dissipative transformations and new energy needs to be added at specific times to keep the oscillations going (Guiard, 1993). Mottet and Bootsma reported that by tuning the four parameters of a single differential equation (a hybrid Duffing-Rayleigh oscillator with softening spring characteristics) one can reproduce the Hooke's portrait trajectories observed in unimanual Fitts' task under a large range of IDs. In other words, the same invariant dynamics hold for a wide range of variations within task constraints, reflecting the very nature of the speed-accuracy trade-off. However, this invariant dynamics gives rise to markedly different flow topologies. Namely, it was found that Fitts' law is not continuous in reciprocal (Huys, Fernandez, & Bootsma, 2009) and discrete (Sleimen-Malkoun, Temprado, Huys, Jirsa, & Berton, 2012) aiming. That is, a transition in the operative motor control mechanisms with increasing task difficulty occurs. In particular, it was found that rhythmic movements were performed in easy tasks and discrete movements in difficult ones.

In the present study we propose an alternative dynamical modelling strategy that can more easily detect the topological transition that underlies the change between rhythmic and discrete movements with ID. Our model is based on the one-dimensional dynamics of phase angles instead of on the two-dimensional dynamics in Hooke's plane, and the model uses only two parameters to describe

phase dynamics. The lower number of parameters and dimensions of our model provides a simpler access to the invariant properties of the behavioral dynamics under speed-accuracy trade-off. In addition, the model allows us to consider bimanual coordination tasks in a two dimensional (toroid) state-space.

Previous work on the bimanual speed-accuracy trade-off has focused on the discrete version of Fitts' task. Kelso, Southard, and Goodman (1979) asked participants to simultaneously perform asymmetric speed-accuracy tasks with both hands. The movements started from a home position and ended in targets at different distances and with different widths. The targets were placed either laterally (Experiments 1 and 2), or directly in front of the participant (Experiment 3), and the movement direction was either away from the body (Experiments 1 and 3) or towards the body (Experiment 2). The authors found that speed and acceleration profiles of the two hands were tightly synchronized in all inspected conditions: The hand with the easy task slowed down to accommodate the task of the more difficult hand. The authors considered these results as evidence that Fitts' law does not hold for bimanual tasks because the control of the limbs is merged into a single coordinative structure, thus sharing a common timing between movements.

However, Riek, Tresilian, Mon-Williams, Coppard, and Carson (2003) presented a series of experiments that partly contradict the conclusions drawn by Kelso et al. In their Experiments 1 and 2 participants performed a number of bimanual Fitts' tasks, each one imposing a different set of constraints (varying movement amplitudes, target widths, and starting positions). In each of these sets of tasks, Fitts' law still holds for the movement of one hand considered alone if the task of the other hand is kept constant. The authors proved that the constraints of the two tasks affect the ipsilateral task, but did not attempt to study this relationships. Rather, they generated different unimanual linear regressions with the ipsilateral movement times (MTs) and IDs for the different contralateral tasks used. Riek et al. confirmed the observation of Kelso et al. (1979) that movements are synchronous in tasks with asymmetric difficulties for each hand. However, they attributed this synchronicity to an appropriate coupling of asynchronies at the beginning (the reaction time, RT) and the end of the movements (the Hoover phase). The authors argued that the synchrony of movements in bimanual Fitts tasks' reflect that this is the more efficient coordinative solution, but they also speculated with possible diverging results if participants are given

further instructions.

Using a novel task in the literature, namely, a cyclical version of the bimanual Fitts' task, we aim to provide a more encompassing characterization of motor control in bimanual speed-accuracy trade-offs. In the present experiment, we used reciprocal aiming movements, we provided further instructions to participants, and we allowed them to practice during seven sessions to promote the emergence of new coordinative solutions. To simplify the design, however, we did not varied amplitudes, directions or starting positions of movements as previous studies did, but we focused on variations of target's width. The use of a reciprocal task reduces the relevance of the terminal asynchronies observed by Riek et al. (2003), and can in principle facilitate the emergence of movements with a genuinely shared timing. The instructions provided to participants attempted to induce different task goals. In the first group, the instructions were similar to those provided in previous bimanual experiments (i.e., move both hands as fast and accurate as possible), whereas in the second group, we also encouraged the exploration of coordinative solutions that require the independent control of arms' movements. The complexity of this task demanded extended periods of practice because the participant had to deal with two asymmetric speed-accuracy trade-offs and with the coordination of polyrhythmic oscillations of the limbs (that can in principle appear). The benefits obtained from using this task are multiple. First, intense skill acquisition can be observed in a relatively short time frame. Second, the experimental design allows for the consideration of bilateral interactions between the tasks. Third, it is straightforward to apply dynamical analysis to the non-linear oscillations of each arm to enhance our understanding of the operative constraints in a bimanual speed-accuracy trade-off, as well as our understanding of how their effects on movement control evolve during skill acquisition. Finally, we are furnished with tools and concepts from synchrony research and coordination dynamics to understand the behavioral dynamics of coupled actions (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, 1995; Kugler & Turvey, 1987; Pikovsky, Rosenblum, & Kurths, 2003).

The following experiment aims to identify the effects of instructions, practice, and speed-accuracy constraints on movement control and execution in a reciprocal bimanual Fitts' task. For each task condition, we report dependent measures concerning movement kinematics and dynamics that are typically reported in studies on unimanual Fitts' tasks as well as measures concerning the coordination

of the limbs and the relative performance of participants in bimanual with respect to unimanual tasks. To formalize the functional relationships between behavioral patterns and task constraints we propose two models. First, we revisit Fitts' law in a bimanual context to provide a more encompassing portrayal of the results obtained in previous investigations of (discrete) bimanual Fitts' tasks. Second, we use a detailed analysis of the timing within a subtask and between subtasks (i.e., arms) to build a minimal dynamical model of the motor control in the bimanual Fitts' task.

## 3.2 Material & Methods

### 3.2.1 Participants, apparatus, and task

Ten healthy volunteers participated in the experiment (three women, seven men). All of them were self-reported right handers and had normal or corrected to normal vision. Their ages ranged from 22 to 40 years. Informed consent was obtained prior to testing.

The experiment was performed with the human KINARM (Kinesiological Instruments for Normal and Altered Reaching Movements) exoskeleton lab (BKIN Technologies, Canada). This apparatus consists of two KINARM exoskeleton robots for the arms and a 2D virtual/augmented reality display that provides virtual targets in the plane of the arms. The exoskeleton robots have hinge joints that align to the participant's shoulder and elbow and allow them to make arm movements in the horizontal plane. Fiberglass braces attach the linkage to the participant's forearm and arm. Motors attached to the mechanical linkages can apply torques to the shoulders and/or elbows.

Participants were instructed to simultaneously move two dots between targets on the KINARM display, under instructions stressing speed as well as accuracy. The left and right dots were moved by extending and flexing the left and right elbow joints, respectively. The dots moved in the sagittal direction between two targets. The targets could be different for each arm. Each trial consisted of 60 aiming movements between the targets (30 cycles).

The four light grey rectangular targets were placed on a black background, with a constant distance between the targets' midpoints in the sagittal (.2 m) and frontal (.1 m) directions. The sagittal target distance is equivalent to the distance

(D) in Fitts original design. The target width for each arm was a controlled experimental factor. The initial condition of the task was in-phase: Both arms started from the farther position. The stimulus presentation was performed using the virtual reality display, producing a time-locked up-down motion of a light grey dot for each of the arms. The position of the dot was proportional to the elbow angle of the same side. A scaling factor of .12 m/rad was applied so that the required movement amplitude in the elbow joint was roughly 1 rad. During a pilot study we found that a weak viscosity force field facilitated the controllability of the task. The elbow and shoulder joints were therefore damped with viscous forces of .2 N/m and 1 N/m, respectively. Shoulder movements did not affect the position of the target dots and were not analysed.

### 3.2.2 Experimental design

Participants were divided in two experimental groups, depending on the specific instructions received. For the *strongly coupled* group, the instructions were to move the arms as fast and accurate as possible. During the pilot study, we observed that these instructions systematically induced phase and frequency-locked movements (as if the arms were ‘tied by a rope’). This is consistent with the results reported by Kelso et al. (1979) and Riek et al. (2003) in discrete bimanual Fitts’ tasks without further instructions, probably because it is the less demanding strategy. For the *weakly coupled* group, the additional instructions were to (try to) move the arms independently of each other, aiming toward movements determined only by their respective difficulties. Due to the high difficulty of this condition, most participants were able to perform it successfully only after several days of training. One of the participants in the weakly coupled group never showed a reduction in the strength of the coupling between the arms.

The height of the targets for each arm had three possible levels: easy targets ( $W = .04$  m,  $ID = 3.6$ ), medium targets ( $W = .02$  m,  $ID = 4.5$ ), and difficult targets ( $W = .005$  m,  $ID = 5.4$ ). Three blocks of trials were used: unimanual with the left arm, unimanual with the right arm, and bimanual. Unimanual left arm blocks had easy and difficult targets. Unimanual right arm blocks had easy, medium, and difficult targets. Bimanual blocks included all ID combinations of the unimanual ID levels:  $ID_{LE}-ID_{RE}$ ,  $ID_{LE}-ID_{RM}$ ,  $ID_{LE}-ID_{RD}$ ,  $ID_{LD}-ID_{RE}$ ,  $ID_{LD}-ID_{RM}$ , and  $ID_{LD}-ID_{RD}$ .

The experiment consisted of test and training sessions, performed during 7

days (starting on Friday) in the following sequence: pre-test, (weekend,) train, train, test, train, train, (weekend,) post-test. The duration of each session was about 1 hour. Test sessions consisted of the bimanual and both unimanual blocks. Each ID combination was used in three trials, randomly presented in each block, resulting in a total of 33 trials per session (18 bimanual, 9 unimanual with the right arm, and 6 unimanual with the left arm). In the test sessions, the allowed number of errors was limited (10% for each arm). If the limit was exceeded, the trial was stopped and it was repeated after the block. In training sessions, only bimanual trials were performed. All training conditions were repeated eight times, resulting in a total of 6 (ID combinations)  $\times$  8 (repetitions) = 48 trials per session, presented in a random order. To encourage the exploration of new movement patterns without excessively prolonging sessions, errors in training sessions were reported to the participant by a shift in the color of the target, from grey to red, for the arm with more than 10% errors, but trials did not have to be redone.

### 3.2.3 Data analysis

#### Pre-processing of signals

Movements were sampled at 1000 Hz. The raw time series were filtered using a 4-th order Butterworth low pass filter with a cut-off frequency of 12 Hz. The beginning of a half-cycle was assumed to correspond to movement reversals (zero crossings of speed). The first five half-cycles of each trial were discarded for data analysis.

#### Laterality and $ID_{\text{diff}}$

The experimental design had bilateral symmetry, allowing for the investigation of laterality effects. However, since these are not the main concern of the present study, we discarded the left-right distinction of the experimental design to facilitate the analyses and the presentation of the results. Also, initial tests showed that the differences between left-right symmetric conditions were rather weak and unreliable compared to the effects of other experimental factors. To discard the left-right distinction, we first redefined the dependent variables to include the values of both arms (note that, for each trial, two dependent measures were obtained: one from the left arm, and one from the right arm). Next, we discarded



the left-right symmetry of the ID factors in consonance with the merged dependent variables. To redefine the ID factor, we considered arms as being ipsilateral or contralateral to the dependent measure. For instance, if one considers the MT measured for the left arm, the left arm is ipsilateral and the right arm contralateral. Next, we defined the independent variable  $ID_{\text{diff}}$  (difference of ID) as the signed difference between the ID of the task of the ipsilateral arm and that of the contralateral arm.

The sign of the variable  $ID_{\text{diff}}$  indicates which arm was more difficult: positive for measures where the ipsilateral task was more difficult; negative for measures where the contralateral task was more difficult; and zero for dependent measures from symmetric trials (i.e., trials where  $ID_{\text{diff}} = 0$ ). In other words, for a certain limb's movement in a bimanual task, a positive  $ID_{\text{diff}}$  indicates that the more difficult subtask was the ipsilateral one, whereas a negative  $ID_{\text{diff}}$  indicates that the subtask of the contralateral arm was the more difficult one. The absolute value of the variable  $ID_{\text{diff}}$  indicates the magnitude of the difference between the task difficulty of each arm. To simplify the visualization of data, we used integer numbers in the levels of the scalar value rather than the exact numerical values of  $ID_{\text{diff}}$ : 0 (no difference of ID), 1 (small difference of ID), and 2 (large difference of ID). The corresponding absolute values of  $ID_{\text{diff}}$  were 0.0, 0.9, and 1.8.

In sum, the used factor  $ID_{\text{diff}}$  had six levels: +2 (measures from ipsilateral difficult and contralateral easy subtasks), +1 (measures from ipsilateral difficult/medium and contralateral medium/easy subtasks, respectively), -2 (measures from contralateral difficult and ipsilateral easy subtasks), -1 (measures from contralateral difficult/medium and ipsilateral medium/easy subtasks), and  $0_E$  and  $0_D$  (measures from low/high ID subtasks in both arms). As indicated below, measures of coordination are defined over relations between the arms, meaning that the ipsilateral-contralateral distinction does not apply for those variables. The factor  $ID_{\text{diff}}$  therefore had three levels: 0 (no difference of ID), 1 (small difference of ID), and 2 (large difference of ID).

### **Transformation of movement time series to polar coordinate system**

Reciprocal aiming movements are characterized by a closed trajectory in the planar state space spanned by position and velocity. As a consequence, we can transform the Cartesian representation of the dynamical system into a polar representation. The state space so defined is spanned by the amplitude and the phase

of the oscillations. Movement's phases ( $\theta$ ) were computed using the arc tangent of the ratio of normalized velocity and position constrained to the interval  $(-\pi, \pi)$ . To compute phase differences, the constrained phases were first transformed to unconstrained and continuous phases. The direction of the oscillations in the state space was counter-clockwise, thus decreasing  $\theta$  with time. To facilitate an intuitive visualization of the figures, we used  $-\theta$  and  $-\dot{\theta}$  in all the plots.

Different representations allow one to focus on different aspects of a process. A phase-amplitude representation splits the timing of oscillations from its scaling. In the present study, we discard amplitude dynamics and focus on phase dynamics to disentangle the movement coordination. Phase dynamics present the temporal unfolding of movements in a single scalar magnitude per oscillator, thus providing a simple access to the dynamics of coordination. In addition, our experimental design constrained amplitude to .1 m in all conditions, thus rendering amplitude dynamics less crucial to understand the properties of the observed movements.

### Coordination measures

Power spectral densities were computed using Welch's periodogram. Dominant movement frequency was obtained for each trial as the frequency with highest power in the spectrum. Locking ratio ( $\rho$ ) was computed as the ratio between the dominant frequencies of the faster over the slower arm in bimanual trials. For deviations smaller than 5%, the simplest fraction was used (that is, 2:1 instead of 40:19). Frequency locking strength (FLS) was estimated as the overlap between power spectrums after correcting  $\rho$  to 1:1 (see Huys, Daffersthoffer, & Beek, 2004, for details). Values of FLS close to 1 indicate perfect frequency locking, whereas values close to 0 indicate the absence of frequency locking. Measurement of phase locking can be very complicated and task dependent (Pikovsky et al., 2003). Because of the presence of polyrhythmic movements in some of the weakly coupled trials, we compensated for the frequency difference to compute the phase difference ( $\phi$ ). We used the best-fitting slope of the unconstrained  $\theta(t)$  to estimate the phase velocity of each arm and computed  $\phi$  with the following expression:

$$\phi = \frac{p_2\theta_1(t) - p_1\theta_2(t)}{(p_1 + p_2)/2} \quad (3.1)$$

where  $p_1$  and  $p_2$  are the best fitting slopes for the unconstrained  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , respectively. The circular standard deviation of  $\phi$  ( $\phi_{SD}$ ) is a good estimator of

the phase locking between oscillators (Pikovsky et al., 2003). Values of  $\phi_{SD}$  close to 0 indicate a strong phase locking, whereas values close to 1 indicate the absence of phase locking.

### **Kinematic measures**

All kinematic measures were computed over half-cycles between movement reversals, and they were averaged (for each arm) over the whole trial using the median. Movement time (MT) is the median duration in seconds of half-cycles in a trial. To avoid an overly extended Results section, we discuss only the results for MT. Initial tests demonstrated that the behavior of other kinematic measures was in many cases similar to the behavior of MT. Also, given the relatively low number of two or three IDs per limb, detailed evaluations of various measures as a function of ID, as performed in several previous studies (cf. Huys et al., 2009; Sleimen-Malkoun et al., 2012), are not very meaningful. For the sake of completeness, however, the other kinematic measures that were computed and analyzed were: peak velocity (the median of the maximum velocity achieved per half-cycle), acceleration time (the median time in a half-cycle with acceleration and velocity of equal sign), deceleration time (the median time in a half-cycle with acceleration and velocity of opposite sign), and acceleration quotient (the median proportion of acceleration time per half-cycle).

### **Dynamic measures**

The harmonicity index (H) is a scalar magnitude that measures deviations of oscillatory movements from harmonicity (Guiard, 1993). H is computed over half-cycles of the acceleration profile delimited by zero crossings of displacement. When only one peak appears in the acceleration profile, H is set to 1. This is typical of harmonic oscillators. When two or more peaks appear, H is computed as the quotient between the minimal and the maximal (absolute) accelerations. In the present study, the final value of H per arm was computed as the median for all half-cycles in a trial.

Human movement dynamics are often considered as being constituted by a deterministic and a stochastic component (van Mourik, Daffertshofer, & Beek, 2006). To disentangle these components one can compute the probability distributions of states at specific moments. The Fokker-Planck equation describes the spatio-temporal evolution of such probability distributions. Let  $x$  be the state

variable or the vector of state variables of a dynamical system, let  $t$  indicate time, and let  $p(x, t)$  be the spatio-temporal probability distribution of states in the dynamical system. The Fokker-Planck formalism expresses the evolution of  $p(x, t)$  as:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = L(x, t) \cdot p(x, t) \quad (3.2)$$

where  $L(x, t)$  is the Fokker-Planck operator:

$$L(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} D^{(1)}(x, t) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} D^{(2)}(x, t) \quad (3.3)$$

The Fokker-Planck operator contains the Kramers-Moyal coefficients  $D^{(1)}$ , referred to as drift, and  $D^{(2)}$ , referred to as diffusion. Drift coefficients express the deterministic component of the dynamics and therefore identify the phase flow, which in turn allows one to examine its corresponding topology.

We estimated the Kramers-Moyal coefficients using the method described by van Mourik et al. (2006) on the temporal series of the phase angle ( $\theta$ ) of each arm's oscillations. To reconstruct the circular state space we adapted the previous method with an appropriate distance function. We divided the interval  $(-\pi, \pi)$  in 61 bins, and for each bin we computed the drift coefficient to estimate the phase flow ( $\dot{\theta}$ ). For each trial, we computed the minimum value of the flow ( $\dot{\theta}_{min}$ ) and the range of the flow ( $\dot{\theta}_{range}$ ). These two values indicate important features of the operant control dynamics. Negative minimal values in the flow appear when the topology of motor control in the vicinity of the targets is a fixed point, and the phase fluctuates around it before actually reaching the target, an indication of discrete control. Positive minimal values of the flow  $\gg 0$  appear when the movements are fast during the whole trajectory, indicating a continuous and close to harmonic movement control. Positive values close to 0 appear when the movements reduce speed to very small values. In this regime, ghost attractor dynamics dominate the system (see Strogatz, 1994, pp. 96-101). The system spends most of the time in the low-speed phase, where its evolution can be more easily influenced by stochastic processes and non-autonomous external drives. The range of the flow expresses the degree of heterogeneity across the cycle in the timing of movements. High values of flow range indicate that some regions of the circular state space present much smaller flow than others. At the end of the Results section, we present a detailed account of the phase dynamics using a

dynamical model.

### **Relative measures**

We defined additional variables to compare kinematic and dynamic measures from bimanual trials with those from unimanual trials. We computed the values of the relative variables on the experimental data before removing the laterality (that is, with two IDs in bimanual trials). For each dependent measure and combination of factors Participant  $\times$  Session  $\times$  ID, we computed the average value of the three replications of the considered dependent measure for the corresponding unimanual combination of factors. To compute the relative H (whose values are constrained to the interval from 0 to 1), we subtracted the unimanual values from the bimanual values. To compute the other relative variables, we divided the bimanual measure by the average of the corresponding three unimanual replications. For coordination related variables, relative measures cannot be computed.

### **Analysis of variance**

The dependent measures were analysed with mixed effects repeated measures analyses of variance (ANOVAs). Group (strongly coupled and weakly coupled) was used as between factor. Session (1, 2, and 3) and ID<sub>diff</sub> (with levels +2, +1, 0<sub>D</sub>, 0<sub>E</sub>, -1, and -2 for bilateral variables; and with levels 0, 1, and 2 for coordination variables) were used as within factors. Type III sums of squares were used following standard practice in the psychological literature. Sphericity assumptions were tested with Mauchly's test, and Huynh-Feldt corrections were used when the sphericity assumptions were violated. To improve the readability, the results of the main effects are summarized in Table 3.1, and the results of the interactions are summarized in Table 3.2. We conducted Holm-Sidak pairwise multiple comparison post-hoc analyses (see Olejnik, Li, Supattathum, & Huberty, 1997, for a detailed review on the topic). Due to the large number of these comparisons, the results of pairwise comparisons are not reported in detail. Instead, we comment the statistically significant and meaningful differences across experimental conditions in the text.

## Regression analysis

To adapt the unimanual Fitts' law (which relates MTs to IDs) to the bimanual scenario, data from bimanual trials were used for non-linear regression analysis. A different regression analysis was performed for each combination of the levels of the factors session and group, onto the merged MTs of the participants of each group. As described in Equation 3.5 below, these regressions relate the MTs of one of the arms ( $MT_{\text{ipsi}}$ ) to a quotient analogous to the ID of the considered arm ( $D_{\text{ipsi}}/W_{\text{ipsi}}$ , with  $W$  being the effective target width, MacKenzie, 1992) as well as the same quotient of the opposite arm ( $D_{\text{contra}}/W_{\text{contra}}$ ).

## 3.3 Results

### 3.3.1 Movement coordination

#### Outline of observed coordinative strategies

The frequency locking ratio ( $\rho$ ) is related to the coordinative solution used by participants. Less than 30% of the trials that may have been expected to present polyrhythmic oscillations because of the asymmetry of the task and the weak coupling instructions, actually were so. Figure 3.1 presents  $\rho$  for each participant across test sessions and IDs. During the first test session (upper row of panels), only Participant 5, who declared being skilled in juggling tasks, produced weak coupling (as indicated by  $\rho > 1$ ). He did so in all asymmetric conditions. During the second test session (middle row of panels), three participants produced polyrhythmic movements, but two of them did so only in the low asymmetry conditions (i.e., when  $ID_{\text{diff}}$  was small). During the final test session (bottom row of panels), four out of five participants in the weakly coupled group reduced the strength of coupling in at least one condition. All three participants that started to generate polyrhythmic movements during the second test session did so in all asymmetric conditions during the final test session.

#### Frequency locking ratio

Line plots with means and standard errors of the variable  $\rho$  are presented in Figure 3.2. The results of the repeated measures ANOVA are given in row 1 of Tables 3.1 and 3.2. The main effect of the factor group was significant. The weakly

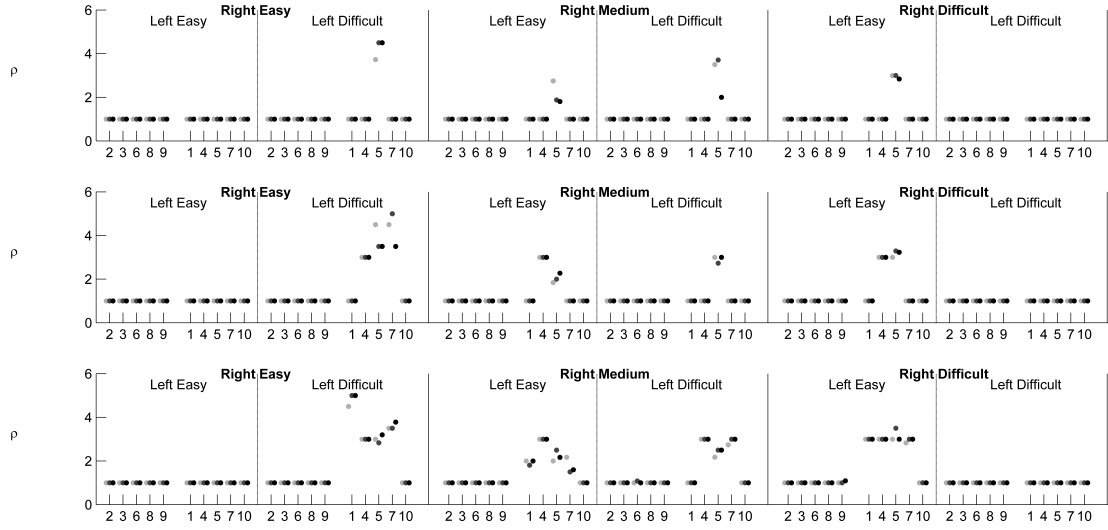


FIGURE 3.1 Scatter plots of frequency locking ratios ( $\rho$ ) by participant, session,  $ID_{\text{left}}$ , and  $ID_{\text{right}}$ . Within each panel, the strongly coupled group is represented on the left (Participants 2, 3, 6, 8, and 9) and the weakly coupled group on the right (Participants 1, 4, 5, 7, and 10). The three test sessions are represented in the three respective rows of panels. The three replications of the ID combinations are indicated by the three dots with increasing darkness per participant and condition.

coupled group showed higher values of  $\rho$  in asymmetric trials (i.e., trials with  $ID_{\text{ipsi}} \neq ID_{\text{contra}}$ ), indicating frequency locking at ratios higher than the 1:1 ratio. The factor  $ID_{\text{diff}}$  also had a significant main effect: the stronger the asymmetry, the higher  $\rho$ . In the strongly coupled group  $\rho$  was always 1, indicating a phase locking of 1:1 regardless of the experimental condition. This was also the case for the weakly coupled group in the symmetric trials. Together, these patterns led to significant  $\text{Group} \times ID_{\text{diff}}$  interactions. The effects of the experimental factors on the other coordination measures were similar to the ones for  $\rho$ , although with slightly different statistical significance levels. We therefore limit our descriptions of the other coordination variables to brief summaries.

### Frequency locking strength

The results of the ANOVA are given in row 2 of Tables 3.1 and 3.2. Whenever polyrhythmic movements appeared ( $\rho \neq 1$ ), FLS dropped from values close to the maximum of 1, to values close to about .65. It is interesting to note that with  $\text{FLS} \approx .65$ , frequency locking was shown to be considerable high even in the polyrhythmic patterns. All the factor had significant main effects on FLS (and stronger than on  $\rho$  and  $\phi_{\text{SD}}$ ), and the interactions  $\text{Group} \times ID_{\text{diff}}$  and  $\text{Group} \times$

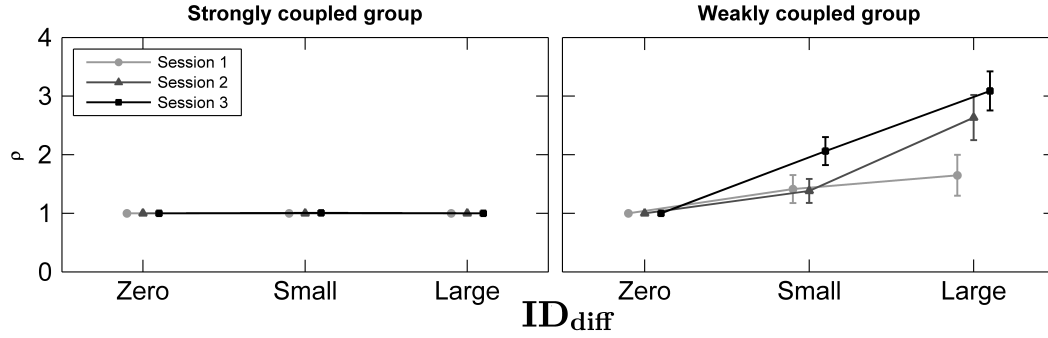


FIGURE 3.2 Frequency locking ratios ( $\rho$ ) as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors.

Session were significant.

### Standard deviation of phase difference

The results of the ANOVA are given in row 3 of Tables 3.1 and 3.2. Whenever polyrhythmic movements appeared,  $\phi_{SD}$  increased from values close to 0 to values around .4. Again, even for the weakly coupled trials,  $\phi_{SD}$  was much lower than 1, thus indicating the existence of phase locking between the arms' oscillations (which, nevertheless, was markedly smaller than in the strongly coupled trials). For all main effects and interactions shown in Tables 3.1 and 3.2, the strength of the effect was lower (or even absent) for  $\phi_{SD}$  than for  $\rho$  or for FLS.

### 3.3.2 Movement kinematics

The MTs for all conditions are presented in Figure 3.3. The results of the repeated measures ANOVA on MT are given in row 4 of Tables 3.1 and 3.2. Practice reduced MT, as evidenced by a significant main effect of session. The overall reduction of MT was stronger at the beginning of training, which is a characteristic time profile of learning tasks (Newell, 1991). The factor  $ID_{diff}$  also affected MT significantly: MTs were extreme in measures from symmetric trials (i.e., trials with  $ID_{ipsi} = ID_{contra}$ ), with the slowest performance when both arms had a high ID and the fastest performance when both arms had a low ID ( $ID_{diff} = 0_E$ ). The MTs in asymmetric trials (i.e., trials with  $ID_{ipsi} \neq ID_{contra}$ ) fell in between. Overall, MT was higher with positive  $ID_{diff}$  (i.e.,  $ID_{ipsi} > ID_{contra}$ ) than with negative  $ID_{diff}$  (i.e.,  $ID_{ipsi} < ID_{contra}$ ), indicating that MT was more constrained by



TABLE 3.1  
Summary of statistical analysis of main effects in repeated measures ANOVAs.

	Group			Session			ID <sub>diff</sub>		
	F	p	$\eta_p^2$	F	p	$\eta_p^2$	F	p	$\eta_p^2$
$\rho$	7.78	.02*	.23	2.22	.14	.05	8.79	<.01*	.18
FLS	7.46	.03*	.20	4.22	.03*	.07	8.76	<.01*	.24
$\phi_{SD}$	4.35	.07	.19	2.41	.12	.04	3.75	.05 <sup>†</sup>	.11
MT	.91	.37	.04	44.51	<.01*	.32	85.29	<.01*	.76
MT <sup>rel</sup>	.01	.94	<.01	2.17	.15	.02	40.11	<.01*	.69
H	2.46	.16	.10	9.78	<.01*	.09	47.48	<.01*	.69
H <sup>rel</sup>	1.76	.22	.04	1.04	.38	.02	47.10	<.01*	.70
$\dot{\theta}_{min}$	.45	.52	.02	24.46	<.01*	.17	53.83	<.01*	.76
$\dot{\theta}_{min}^{rel}$	.09	.77	<.01	6.12	<.01*	.04	50.49	<.01*	.66
$\dot{\theta}_{range}$	1.67	.23	.09	.85	.45	.03	6.29	<.01*	.10
$\dot{\theta}_{range}^{rel}$	.02	.88	<.01	.90	.43	.01	3.96	.01*	.20

Note: Asterisks indicate significance at the level  $p < .05$ . <sup>†</sup> symbols indicate significant effects that were lost after correcting for sphericity. Relative variables are indicated with the superscript “rel”.

the ipsilateral task than by the contralateral task.

The experimental instructions induced different patterns of MTs per ID condition, as evidenced by the significant  $\text{Group} \times \text{ID}_{diff}$  interaction. The strongly coupled group performed faster than the weakly coupled group for positive  $\text{ID}_{diff}$ . Reciprocally, the weakly coupled group performed faster than the strongly coupled group for negative  $\text{ID}_{diff}$ . It is also interesting to note that the performance of the strongly coupled group in asymmetric trials did not depend on the sign of  $\text{ID}_{diff}$ , although smaller asymmetries allowed for shorter MTs. In contrast, the weakly coupled group was significantly slower with positive than with negative  $\text{ID}_{diff}$ . In sum, these results indicate that in the strongly coupled strategy both sources of constraint had similar effects on MT, whereas in weakly coupled coordinative solutions, the constraints of the ipsilateral task dominated over the constraints of the contralateral task, allowing for faster movements than in the other group in trials with negative  $\text{ID}_{diff}$ .

The improvement with practice was not the same for different ID conditions, as evidenced by the significant  $\text{Session} \times \text{ID}_{diff}$  interaction. The MTs with positive  $\text{ID}_{diff}$  improved at the beginning of training (from the first to the second test

TABLE 3.2  
Summary of statistical analysis of interactions in repeated measures ANOVAs.

	Group $\times$ Session			Group $\times$ ID <sub>diff</sub>			Session $\times$ ID <sub>diff</sub>			Group $\times$ Session $\times$ ID <sub>diff</sub>		
	F	<i>p</i>	$\eta_p^2$	F	<i>p</i>	$\eta_p^2$	F	<i>p</i>	$\eta_p^2$	F	<i>p</i>	$\eta_p^2$
$\rho$	2.20	.14	.05	8.79	<.01*	.18	1.15	.35	.04	1.15	.35	.04
FLS	4.02	.04*	.07	7.21	.01*	.21	2.22	.09	.08	2.36	.07	.08
$\phi_{SD}$	2.50	.11	.04	3.74	.05†	.11	1.01	.42	.02	1.00	.42	.02
MT	.36	.70	<.01	6.23	<.01*	.19	3.25	<.01*	.09	1.66	.11	.05
MT <sup>rel</sup>	.72	.50	.01	3.11	.02*	.15	2.05	.04†	.04	3.51	<.01*	.07
H	.51	.61	.01	4.76	<.01*	.18	3.60	<.01*	.08	4.56	<.01*	.10
H <sup>rel</sup>	.76	.48	.01	6.25	<.01*	.24	1.87	.06	.05	5.83	<.01*	.15
$\dot{\theta}_{min}$	.86	.44	.01	2.82	.03†	.14	12.70	<.01*	.17	3.32	<.01*	.05
$\dot{\theta}_{min}^{rel}$	.19	.83	<.01	6.96	<.01*	.21	1.22	.29	.03	1.25	.27	.04
$\dot{\theta}_{range}$	.24	.79	.01	1.82	.13	.03	3.90	<.01*	.05	1.12	.36	.02
$\dot{\theta}_{range}^{rel}$	.22	.80	<.01	.78	.57	.05	2.38	.02*	.05	.45	.92	.01

Note: Asterisks indicate significance at the level  $p < .05$ . † symbols indicate significant effects that were lost after correcting for sphericity. Relative variables are indicated with the superscript “rel”.

session), whereas with negative ID<sub>diff</sub> the MTs continued to improve throughout the experiment. The sphericity-corrected three-way interaction did not reach significance. Let us note, however, that whereas the strongly coupled group seemed to improve in all ID<sub>diff</sub> conditions, the weakly coupled group seemed to improve only with negative or zero ID<sub>diff</sub> (see Figure 3.3). Despite the non-significance of the three-way interaction, the Holm-Sidak pairwise comparisons confirmed these effects: The strongly coupled group improved performance similarly in all ID<sub>diff</sub> conditions, but only from first to second session, whereas the weakly coupled group improved MT in all sessions but only when the contralateral task was more constraining.

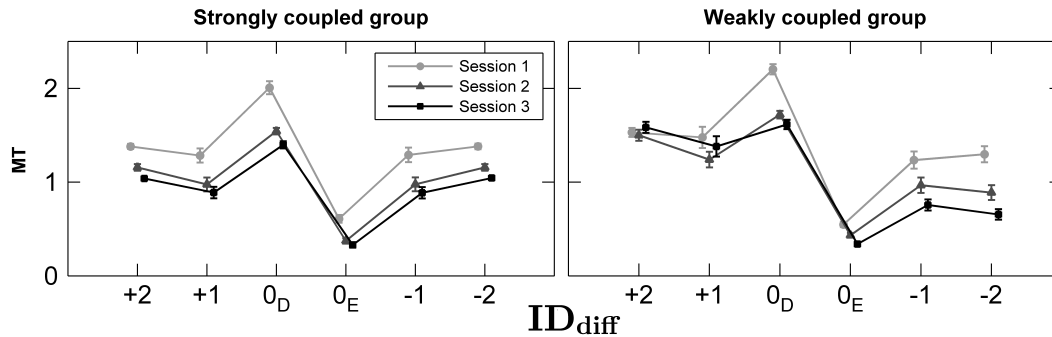


FIGURE 3.3 MT as a function of group, session, and ID<sub>diff</sub>. Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors.

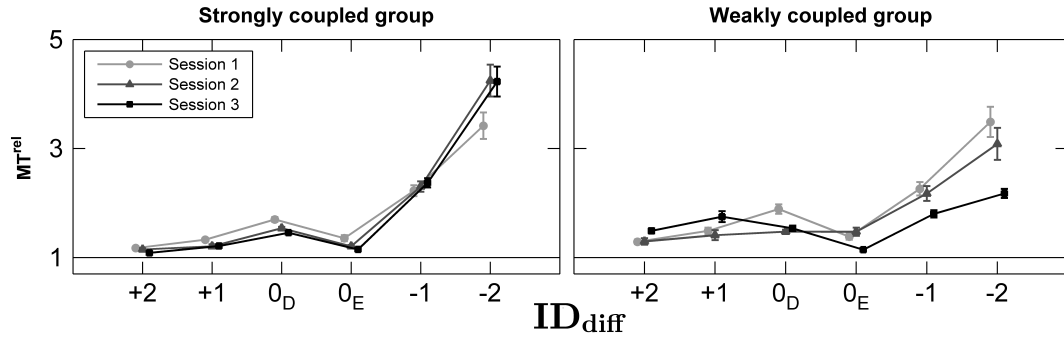


FIGURE 3.4 Relative MT as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors. The horizontal black line at  $MT^{rel} = 1$  highlights the point of equality between bimanual and unimanual performance. Values above this line indicate faster unimanual MTs.

The relative MTs for all conditions are presented in Figure 3.4. The results of the repeated measures ANOVA on relative MT are given in row 5 of Tables 3.1 and 3.2. On average, MTs in bimanual tasks were slower than unimanual tasks in all conditions, despite the presence of individual trials with faster bimanual MTs. The significant main effect of  $ID_{diff}$  indicates that the relative MT was significantly higher for negative  $ID_{diff}$ , with movements up to five times slower in bimanual tasks. For movements performed under positive or symmetric  $ID_{diff}$ , the bimanual MTs were similar to the unimanual MTs. The two-way interaction between factors session and  $ID_{diff}$  was significant: Improvement with practice was measured only when  $ID_{diff}$  was negative. The three-way interaction was also significant. In the strongly coupled group, practice had almost no effects. On the contrary, practice decreased the relative MT in the weakly coupled group if  $ID_{diff}$  was negative, and marginally increased MT for positive  $ID_{diff}$ .

These results confirm that the intended coordinative solution alters the operant constraints in bimanual speed-accuracy trade-offs. A strongly coupled coordination entails that ipsilateral and contralateral tasks similarly constraint MT. On the contrary, in a weakly coupled strategy the ipsilateral task is the dominant constraint on MT. In this group, the effect of the ipsilateral task is so strong that almost no improvement with practice is observed for positive  $ID_{diff}$ , whereas the reduced effects of the contralateral task constraints allowed for much faster MTs for negative  $ID_{diff}$  (the fastest MT measured in an asymmetric trial was for  $ID_{diff} = -2$  in the weakly coupled group) and improvement with practice throughout the experiment. The relative MT also confirms these differences. The ipsilateral task

constrained movements similarly in the two groups and in the two tasks, yielding relative MTs of about 1, and evidencing no effects of practice. On the contrary, the contralateral task was very constraining for the strongly coupled group, but much less constraining for the weakly coupled group. As a consequence, the relative MT of the strongly coupled group was very high and did not improved with practice, whereas in the weakly coupled group, the values were closer to 1 and improved considerably with practice (that is, the bimanual MTs improved more than the unimanual MT).

In sum, we have observed that the used coordinative solution imposes different relations between the MTs of one arm and the IDs of both arms, and that these relations are further modulated by practice. In addition, the functional relationship between MT and ID in a bimanual task cannot be described with a linear combination of two unimanual Fitts' laws because the constraints of the two tasks interact. Moreover, this interaction depends on the task instructions. In the next section we therefore proceed to formulate an analogue of Fitts' law for bimanual tasks that directly addresses the interaction between subtasks.

### 3.3.3 Bimanual Fitts' law

In the classic Fitts' law for a unimanual task, MT is a linear function of ID (which is the logarithm of a ratio between target width and movement amplitude). The logarithm was chosen to be base 2 to express the ID in information units (bits), to parallel the Shannon's law that inspired Fitts' formulation (Fitts, 1954). During the era of the cognitive and cybernetic revolutions, this step was intuitively appealing because it provided a quantitative link (the law itself) and a metaphoric link (perception-action system as a bidirectional channel to transmit information) with the information-processing paradigm. However, several functions of detectable magnitudes of the visual layout (as defined through target distance and width) can produce very strong fits of MTs in a Fitts' task (see MacKenzie, 1992, for a variety of examples). We are not committed to the information-processing paradigm, nor convinced by the information-channel metaphor. We, therefore, tackled the task with an open mind, trying to focus on simplicity to express the constraints that give rise to observed movement patterns.

A logarithmic expression requires four parameters to describe a task with two

pairs of targets with significant interactions among them:

$$MT_{ipsi} = a + b \cdot ID_{ipsi} + c \cdot ID_{contra} + d \cdot ID_{ipsi} \cdot ID_{contra} \quad (3.4)$$

In this formulation,  $MT_{ipsi}$  is the movement time for one of the arms, which is described as a function of the ID for that arm ( $ID_{ipsi}$ ) and the ID for the opposite arm ( $ID_{contra}$ ). The formulation keeps the information theory based nomenclature but it introduces a polynomial interaction term that is difficult to interpret.

Potential functions provide an alternative formulation for our bimanual task that requires at least one parameter less. The potential function that relates ID and MT in unimanual tasks has two free parameters (MacKenzie, 1992):  $MT = a \cdot \left(\frac{D}{W}\right)^b$ . The quotient  $\frac{D}{W}$  is an index of task accuracy, because it expresses the degree of accuracy demanded by the task (throughout this section we use the effective target widths; see McKenzie, 1992, for details). The simplest potential expression relating bimanual indices of accuracy with MT has three parameters:

$$MT_{ipsi} = a \cdot \left(\frac{D_{ipsi}}{W_{ipsi}}\right)^b \cdot \left(\frac{D_{contra}}{W_{contra}}\right)^c \quad (3.5)$$

The coefficient  $a$  is an estimation of the minimal MT required to perform a movement of amplitude  $D$  without precision constraints (that is, an index of accuracy of 1) whereas the coefficients  $b$  and  $c$  express the magnitude of the effects of precision constraints for each limb on the ipsilateral MT. Higher exponents determine longer movement times for a certain value of the index of accuracy.

Table 3.3 presents the results of the non-linear regressions with the potential function. Data from bimanual trials are split by session and group, and merged across participant. An additional regression with data merged across sessions for each group is also presented. Equation 3.5 was used for all regressions, except for the unimanual model presented in the last row of Table 3.3, where the 2-parameter univariant version of Equation 3.5 was used. The first two rows contain the results for the strongly and the weakly coupled groups. The last row contains the results of the univariant model for the weakly coupled group. Figure 3.5 displays the data points and the best fitting surfaces across sessions, for both experimental groups.

We first performed a linear regression of MT onto ID for the unimanual conditions averaged across participants, as an initial check to corroborate the close

TABLE 3.3  
Bimanual Fitts' law: Results of non-linear regressions of MT onto  $D_{\text{ipsi}}/W_{\text{ipsi}}$  and  $D_{\text{contra}}/W_{\text{contra}}$  across sessions and groups.

		<i>a</i>			<i>b</i>		<i>c</i>	
		$r^2$	Estimate	<i>p</i>	Estimate	<i>p</i>	Estimate	<i>p</i>
Strongly	All	.70	.19	<.001*	.34	<.001*	.34	<.001*
Coupled	S1	.81	.22	<.001*	.34	<.001*	.35	<.001*
Group	S2	.79	.17	<.001*	.35	<.001*	.34	<.001*
3-parameter	S3	.87	.15	<.001*	.35	<.001*	.36	<.001*
Weakly	All	.57	.25	<.001*	.50	<.001*	.10	<.001*
Coupled	S1	.66	.27	<.001*	.44	<.001*	.22	<.001*
Group	S2	.66	.23	<.001*	.52	<.001*	.09	.001*
3-parameter	S3	.67	.19	<.001*	.62	<.001*	.03	.326
Weakly	All	.55	.31	<.001*	.53	<.001*	-	-
Coupled	S1	.54	.41	<.001*	.49	<.001*	-	-
Group	S2	.65	.27	<.001*	.55	<.001*	-	-
2-parameter	S3	.67	.21	<.001*	.62	<.001*	-	-

Note: Asterisks indicate significance at the level  $p < .05$ . All = all sessions; S1 = session 1; S2 = session 2; S3 = session 3.

relation between MT and ID described by Fitts' law (Fitts, 1954; Fitts & Peterson, 1964). ID explained 75% of the variance in MT ( $MT = .32 \times ID - .72$ ,  $p < .001$ ). This result validates the suitability of our experimental setup to study Fitts' task, although also evidences weaker correlation strengths between MT and ID in our setup than the values typically reported in the literature.

The strongly coupled group showed high correlations ( $r^2$ s up to .87, in the last session). Practice reduced the value of the coefficient  $a$  from  $.22 \pm .02$  s in the first test session to  $.15 \pm .01$  s in the third test session, which reflects the overall reduction of the MTs across sessions. The exponents had similar values for both arms (about  $.35 \pm .02$ ) during all sessions for the strongly coupled group, although the explained variability was higher towards the end of the experiment. The weakly coupled group had lower correlation strengths ( $r^2$ s up to .67). Again, practice decreased the coefficient  $a$ , from  $.27 \pm .03$  s in the first session to  $.19 \pm .03$  s in the last session. The evolution with practice of the exponents was opposite, although their sum was always between .60 and .65. Whereas the exponent  $b$

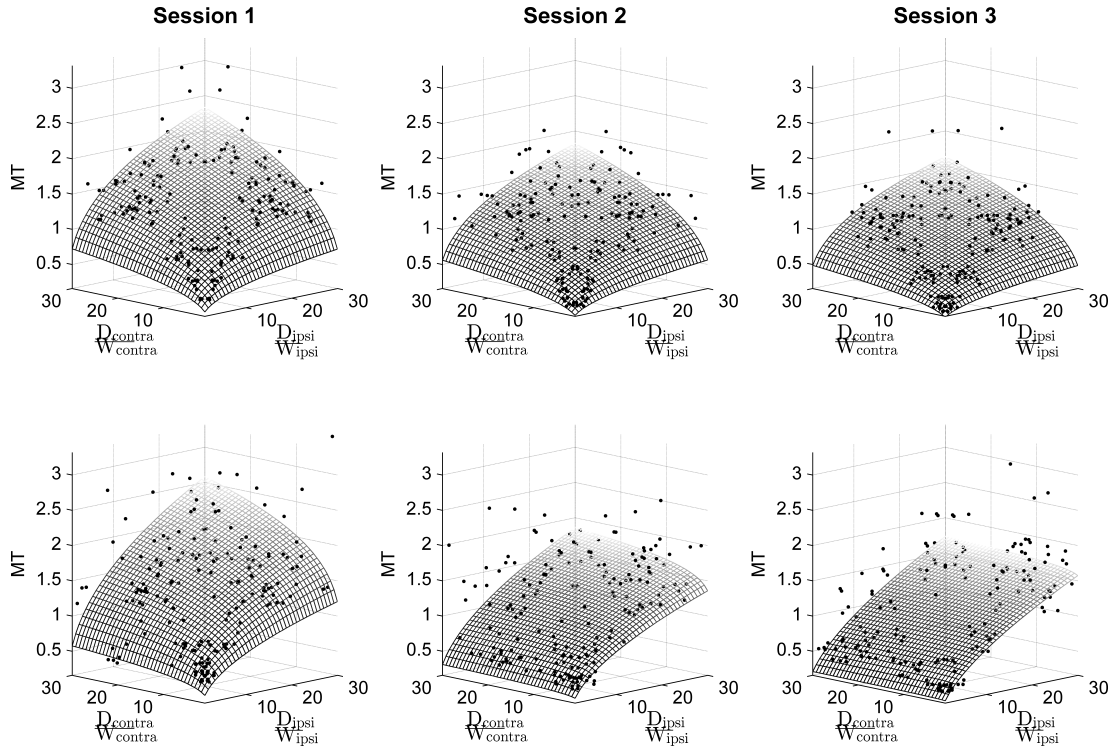


FIGURE 3.5 Regression surfaces for the bimanual Fitts' law. Bidimensional regressions of  $MT_{ipsi}$  on  $D_{ipsi}/W_{ipsi}$  and  $D_{contra}/W_{contra}$  for strongly coupled (upper row) and weakly coupled groups (lower row). Observe the different evolution of the regression surfaces with training.

increased with practice from  $.44 \pm .03$  to  $.62 \pm .04$ , the exponent  $c$  decreased from  $.22 \pm .03$  to  $.03 \pm .03$  (the only coefficient in the table with a not significant  $t$  test).

To further test the reduction of the effects of the contralateral constraints in the weakly coupled group we fit the data from that group to a model that did not include the term for the contralateral arm (that is, a unimanual 2-parameter model). Results are summarized in the last row of Table 3.3. For the last sessions, the regression strengths for the unimanual model were equal to those of the bimanual model. This means that, in this condition, the movement variability can be explained as well with a model with one free parameter less. The coefficient  $a$  started with a value of  $.41 \pm .04$  s in the first session, and after training its value was  $.21 \pm .03$  s, whereas the exponent  $b$  started with a value of  $.49 \pm .04$  in the first session, and finished the training with a value  $.62 \pm .04$  (exactly the same as in the bivariate model).

In sum, a reciprocal bimanual task broadens the action space. In our analyses

of the MTs, we have observed two coordinative solutions. On the one hand, the strongly coupled coordination is the more spontaneous response to a demanding perceptuo-motor task, as observed by Kelso et al., (1979) and Riek et al. (2003). This coordination pattern reduces the perceptual and coordinative load by merging the control of the limbs into one single entity. As a consequence, the interaction between the subtasks is very strong and well described by the double potential function proposed in Equation 3.5. Synchrony in our task appeared because movements shared a common timing, and not by mutually cancelling asynchronies between movements at the beginning and end of each aiming movement, as Riek et al. observed for the discrete task. However, we can confirm the observation of Riek et al. (2003) that a unimanual Fitts' law can describe the MTs of one limb if the task of the other limb is identical (see any panel of Figure 3.5, where a unimanual potential law for the MTs of the ipsilateral limb is obtained by setting a constant value of  $D_{\text{contra}}/W_{\text{contra}}$ ). On the other hand, the weakly coupled coordination entails the achievement of a certain dynamic independence of limbs' movements but requires extensive training to be mastered. After practice, MTs performed under these instructions can be described with a single potential function or a logarithmic expression (as Riek et al. did). The contralateral limb produces a constant increase of MTs (expressed in the higher value of coefficient  $a$ ), but the functional dependence on the specific properties of the contralateral task vanishes throughout learning.

### 3.3.4 Movement dynamics

#### ANOVA on Harmonicity

The means and standard errors of  $H$  are presented in Figure 3.6, and the corresponding results of the ANOVA are given in row 6 of Tables 3.1 and 3.2. The significant main effects of the factors session and  $ID_{\text{diff}}$  and the two-way interaction  $\text{Group} \times ID_{\text{diff}}$  and  $\text{Session} \times ID_{\text{diff}}$  are to a large extent a consequence of the three-way interaction. We therefore focus our report on the three-way interaction. The strongly coupled group behaved similarly for negative and positive values of  $ID_{\text{diff}}$ :  $H$  increased moderately with practice (i.e., the movement became more harmonic) when  $ID_{\text{diff}}$  was small and when both arms were easy. These increases occurred from the first to the second test session. For the other conditions,  $H$  was always close to 0. On the contrary, for the weakly coupled group we ob-



served different behaviors for positive and negative values of  $ID_{diff}$ : Practice had no effect on  $H$  for  $ID_{diff} \geq 0$ , but had very strong effects when  $ID_{diff}$  was negative (i.e.,  $ID_{ipsi} < ID_{contra}$ ), reaching values close to  $H = 1$  (i.e., perfectly harmonic) for trials with a large  $ID$  difference. This increase of  $H$  was significant from the first to the second as well as from the second to the third test sessions. In other words, movement harmonicity is differently affected by ipsilateral and contralateral constraints depending on the intended coordinative solution. If participants intend to produce tightly coupled movements, both tasks similarly constrain the harmonicity of movements. Thus, for a certain asymmetry,  $H$  does not depend on which arm is more difficult. On the contrary, if participants intend to produce weakly coupled movements, the ipsilateral task has a much stronger effect on  $H$  than the contralateral task. This is so especially in the later test sessions, where the movements become very harmonic even if the contralateral task is difficult.

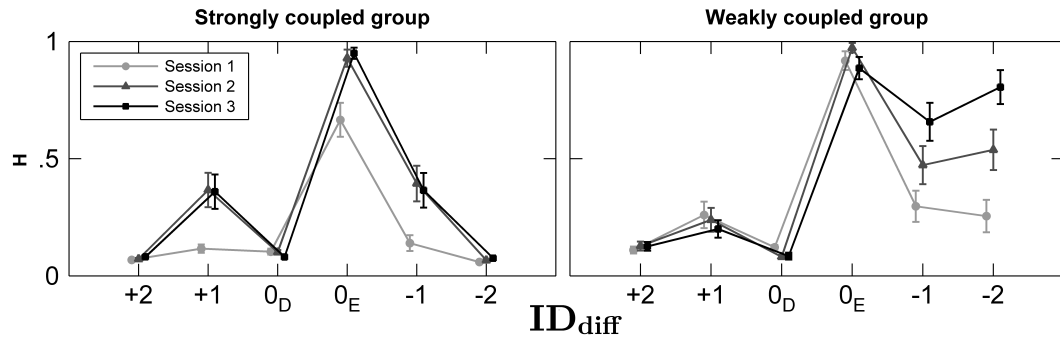


FIGURE 3.6  $H$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors.

The means and standard errors of the relative  $H$  are presented in Figure 3.7, and the corresponding results of the ANOVA are given in row 7 of Tables 3.1 and 3.2. The results for this variable were similar to the ones for the relative MT (note that, for the variable relative  $H$ , lower values indicate more harmonic unimanual performance). With positive or symmetric  $ID_{diff}$ , movements were performed with similar  $H$  in bimanual and unimanual tasks in both groups, even with higher bimanual average  $H$  for some conditions (see  $ID_{diff} = +1$  in left panel and  $ID_{diff} = +2$  in right panel of Figure 3.7). With more difficult contralateral tasks ( $ID_{diff} < 0$ ), bimanual movements are significantly less harmonic. In the strongly coupled group, practice induced similar effects on unimanual and bimanual  $H$ , thus keeping the relative  $H$  almost invariant with practice. On the contrary, the

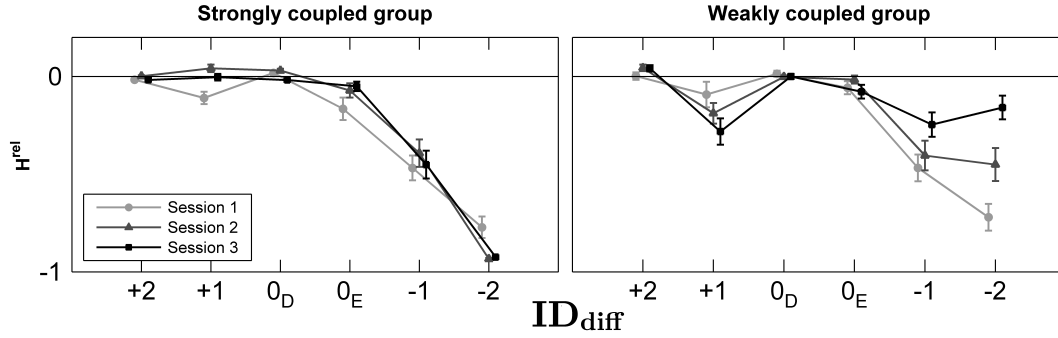


FIGURE 3.7 Relative  $H$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors. The horizontal black line at  $H^{rel} = 0$  highlights the point of equality between bimanual and unimanual performance. Values below this line indicate more harmonic movements in unimanual tasks.

weakly coupled group presented large effects of practice on the relative  $H$ . For negative  $ID_{diff}$ , practice increased the relative  $H$  up to values close to 0 (the point of equality for this variable), whereas for  $ID_{diff} = +1$ , practice slightly reduced the relative  $H$ . For symmetric tasks and tasks with large ipsilateral asymmetry, the bimanual  $H$  is similar to the unimanual one.

### ANOVA on $\dot{\theta}_{min}$

The means and standard errors of  $\dot{\theta}_{min}$  for all conditions are presented in Figure 3.8. The results of the repeated measures ANOVA are given in row 8 of Tables 3.1 and 3.2. The pattern of results for  $\dot{\theta}_{min}$  closely matched the results for  $H$ : The effect of ipsilateral and contralateral precision constraints is symmetric for the strongly coupled coordinative solution, and asymmetric for the weakly coupled solution. It is interesting to consider  $\dot{\theta}_{min}$  with respect to the three dynamical regimes explained in the Materials and Methods section. In all conditions,  $\dot{\theta}_{min}$  was positive, indicating that fixed-point discrete control was not operative in our experiment. Thus, the relatively common but episodic movement reversals were due to the influence of non-autonomous drives external to the non-linear oscillator. The conditions that yielded  $\dot{\theta}_{min}$  below 1 matched those with inharmonic movements, whereas the conditions with  $\dot{\theta}_{min}$  clearly above 1 matched those with harmonic movements. Therefore, inharmonic movements in our task indicate that the flow topology underlying movement control is best described as a ghost attractor. From the first to the second test session, the strongly coupled group

slightly modified the phase flow topology under small  $ID_{diff}$  constraints, reducing the effect of the ghost. On the contrary, for the weakly coupled group, the effects of practice on the topology of the operant dynamics were more intense if  $ID_{diff} \leq 0$ , and completely absent in the other conditions.

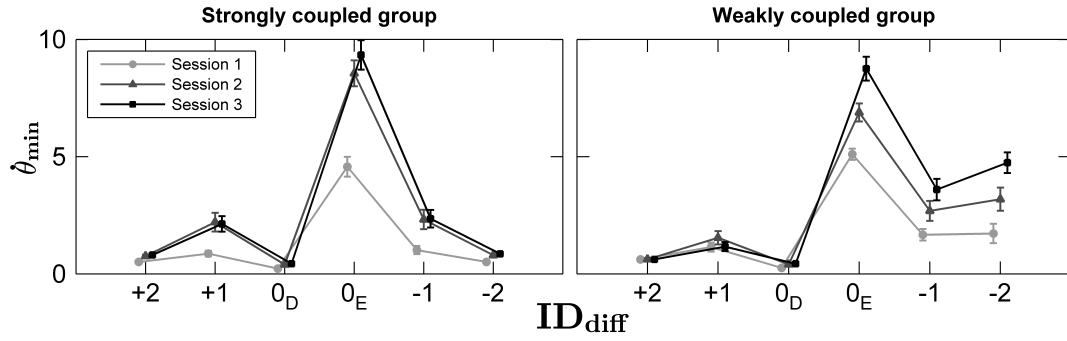


FIGURE 3.8 The flow parameter  $\dot{\theta}_{min}$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors.

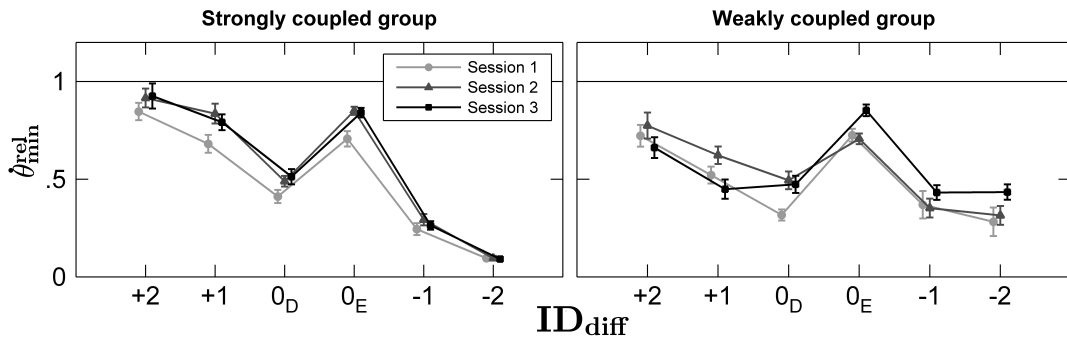


FIGURE 3.9 Relative  $\dot{\theta}_{min}$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors. The horizontal black line at  $\dot{\theta}_{min}^{rel} = 1$  highlights the point of equality between bimanual and unimanual performance. Values below this line indicate larger ghost distance in unimanual conditions.

The means and standard errors of the relative  $\dot{\theta}_{min}$  are presented in Figure 3.9, and the corresponding results of the ANOVA are given in row 9 of Tables 3.1 and 3.2. The average  $\dot{\theta}_{min}$  was two times higher in unimanual than in bimanual tasks. The relative  $\dot{\theta}_{min}$  presents a pattern of results that closely follows the observed ones for other relative variables (although lower values were observed when both tasks were difficult). Practice increased the relative  $\dot{\theta}_{min}$  from first to second session, as evidenced by the significant effect of factor session, but

this improvement ceased from second to third session. The factor  $ID_{diff}$  also had significant main effects: In tasks with positive  $ID_{diff}$ , the bimanual  $\dot{\theta}_{min}$  is only 20% less than the unimanual one, whereas in tasks with negative  $ID_{diff}$ , the unimanual  $\dot{\theta}_{min}$  is more than 5 times higher than the bimanual one. The two-way interaction between factors group and  $ID_{diff}$  was significant. The strongly coupled group had higher relative  $\dot{\theta}_{min}$  than the weakly coupled group when  $ID_{diff}$  was positive, with values close to one. On the contrary, the weakly coupled group had higher relative  $\dot{\theta}_{min}$  than the strongly coupled group when  $ID_{diff}$  was negative. Both groups performed similarly in symmetric trials.

### ANOVA on $\dot{\theta}_{range}$

The means and standard deviations of  $\dot{\theta}_{range}$  for all conditions are presented in Figure 3.10. The results of the ANOVA are given in row 10 of Tables 3.1 and 3.2. The evolution of  $\dot{\theta}_{range}$  with respect to the experimental factors was less consistent than the one observed for  $\dot{\theta}_{range}$ . Overall, we can observe that  $\dot{\theta}_{range}$  was higher for the strongly coupled group. We can also observe in Figure 3.10 that the variations of  $\dot{\theta}_{range}$  in the weakly coupled group did not seem to depend very much on the factor  $ID_{diff}$ , although there was an increase of  $\dot{\theta}_{range}$  with practice in all  $ID_{diff}$  conditions. The only significant main effect was the one of the factor  $ID_{diff}$ . Whenever at least one of the tasks in a trial was difficult, participants controlled movements using a high  $\dot{\theta}_{range}$ , an effect that was more pronounced with larger asymmetries in task constraints (also because large asymmetry implies that one of the tasks is difficult). This indicates that performing high precision tasks under speed constraints requires a more heterogeneous flow within a cycle: During the high precision phase (approaching a target), the movements are performed with a low velocity, and during the low precision phase (in between targets), the movements are performed at the maximal velocity that the participant can reach before hitting the target again.

The means and standard deviations of the relative  $\dot{\theta}_{range}$  for all conditions are presented in Figure 3.11. The results of the ANOVA are given in the last row of Tables 3.1 and 3.2. The factor  $ID_{diff}$  had significant effects on the relative  $\dot{\theta}_{range}$ : For positive and neutral  $ID_{diff}$  bimanual and unimanual movements had similar  $\dot{\theta}_{range}$ , and for negative  $ID_{diff}$  the bimanual movements are controlled with higher non-linearities than movements in unimanual tasks. The interaction between factors session and  $ID_{diff}$  was significant, because the effects of practice were

consistently observed only when the contralateral task was the more difficult. We next present a model of phase dynamics to better understand how task constraints affect movement control and execution.

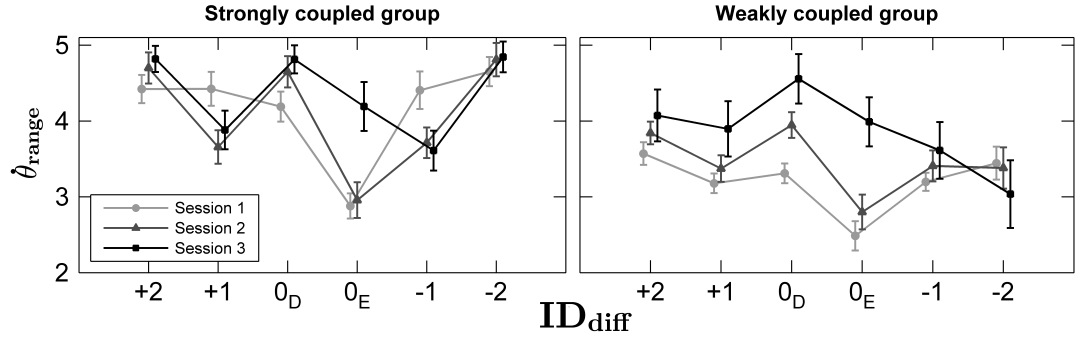


FIGURE 3.10 The flow parameter  $\dot{\theta}_{range}$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors.

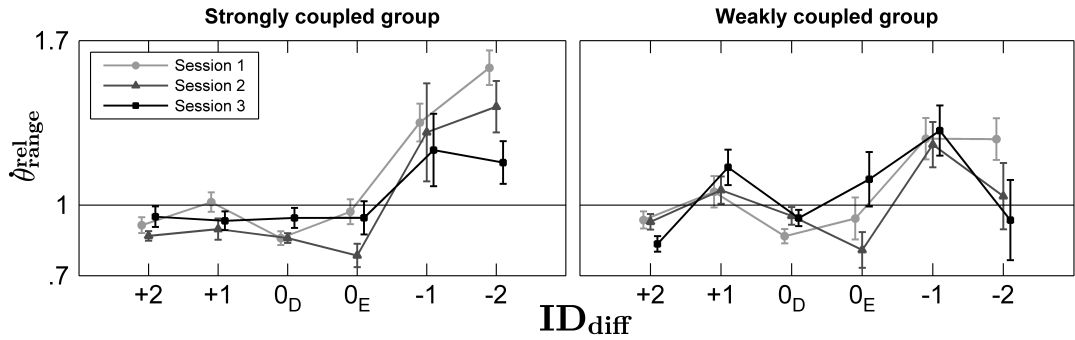


FIGURE 3.11 The flow parameter  $\dot{\theta}_{range}$  as a function of group, session, and  $ID_{diff}$ . Results for the strongly coupled group are presented in the left panel and for the weakly coupled group in the right panel. Error bars indicate standard errors. The horizontal black line at  $\dot{\theta}_{rel, range} = 1$  highlights the point of equality between bimanual and unimanual performance. Values above this line indicate larger non-linearity in bimanual conditions.

### 3.3.5 Dynamical model of $\theta$

The cyclic nature of the dynamics of  $\theta$  implies that the temporal derivative of  $\theta$  is a  $2\pi$  periodic function of  $\theta$ . In other words, the transitions between states are repeated every oscillation. The dynamics of  $\theta$  can therefore be studied as a one-dimensional flow on the circle using  $2\pi$  periodic differential equations of the form  $\dot{\theta} = f(\theta)$ . To fully describe the phase oscillator we need to find the  $f(\theta)$  that better suits the observed dynamics. One may look ahead to the black

curves in the left panels of Figure 3.15 to observe the functional dependence between  $\dot{\theta}$  and  $\theta$  for selected unimanual easy (top panel) and difficult (bottom panel) trials. A perfectly harmonic oscillator would yield a constant  $\dot{\theta}$  for all phases. In contrast, one can observe in Figure 3.15 that the flow intensity is heterogeneously distributed across the cycle. Above the targets (at  $\theta = 0$  and  $\theta = \pm\pi$ ), participants perform at maximal phase velocity in easy trials, and with a close to zero phase velocity in difficult trials. In between targets, participants perform at minimal (albeit high) phase velocity in easy trials, and at maximal phase velocity in difficult trials (yet smaller than the minimal in easy trials).

### Minimal formulation for a unimanual movement

To summarize the invariant relationships induced by task constraints in the circular state space we propose the following formulation:

$$-\dot{\theta} = \omega + \mu \cdot g(\theta) \quad (3.6)$$

where  $\omega$  is a linear term that stands for the average frequency of the oscillation (and therefore is constrained to positive values) and  $\mu$  is a parameter that scales the dynamics of  $g(\theta)$  to the movement non-linearity. The function  $g(\theta)$  is a  $2\pi$  periodic function that represents the heterogeneous evolution of movements across the cycle in response to task constraints. An initial visual inspection of the reconstructed  $(\theta, \dot{\theta})$  vector fields (as in Figure 3.15) revealed two characteristic modes of oscillations in  $g(\theta)$  present in both easy and difficult trials: a strong component, in the first harmonic of movement frequency (that is, once per aiming movement), and a weaker component, in the second harmonic of movement frequency (twice per aiming movement). On the basis of this initial observation, we propose a function  $g(\theta)$  that generates the dynamics of both easy and difficult trials. The two behavioral dynamics are produced by the same fundamental dynamics with appropriate variations in two parameters:

$$g(\theta) = g(\theta + 2\pi) = 2 \sin(2(\theta + a) + b) + \cos(4(\theta + a)) \quad (3.7)$$

The pair  $(a, b)$  parameterizes the summation of the two harmonic components of  $g(\theta)$  for the different task difficulties. Based on our initial exploration of the model, in easy trials the pair was set at  $(\pi/2, -\pi/2)$  whereas in difficult trials it

was set at  $(\pi/3, 0)$ . This yields the following expressions for  $\dot{\theta}$ :

$$-\dot{\theta}_E = \omega + \mu \cdot g_E(\theta) = \omega + \mu \cdot [2 \sin(2\theta + \frac{\pi}{2}) + \cos(4\theta)] \quad (3.8)$$

$$-\dot{\theta}_D = \omega + \mu \cdot g_D(\theta) = \omega + \mu \cdot [2 \sin(2\theta + \frac{2\pi}{3}) + \cos(4\theta + \frac{4\pi}{3})] \quad (3.9)$$

With Equation 3.8 being for easy tasks and Equation 3.9 being for difficult tasks.

### Ghost distance and speed-accuracy trade-off

The dynamical stability of Equation 3.6 depends on the relationship between the linear and the non-linear terms (Strogartz, 1994). We can compute the minimal flow ( $\dot{\theta}_{min}$ ) for each condition from the model using the following expressions:

$$\dot{\theta}_{min} = \omega + \mu \cdot \min[g(\theta)] \quad (3.10)$$

We computed  $\dot{\theta}_{min}$  with the functions  $g(\theta)$  from Equations 3.8 and 3.9. The values obtained were  $\omega - 3 \cdot \mu$  in easy trials and  $\omega - 1.5 \cdot \mu$  in difficult trials. If  $\dot{\theta}_{min} \ll 1$ , the system will asymptotically approach a stable equilibrium. This bottleneck effect is due to a ghost attractor, which is the reminiscent effect of a saddle-node bifurcation that occurs when  $\dot{\theta}_{min} = 0$  (Strogartz, 1994). To illustrate how a ghost attractor can be taken advantage of in the modelling, Figure 3.12 presents simulations of the system described in Equation 3.9 with increasing values of  $\omega$  and a fixed  $\mu$  of 2. In the left panel we can observe how the ghost distance ( $\dot{\theta}_{min}$ , i.e., the minimal distance between  $\dot{\theta}$  and the horizontal axis) increases with  $\omega$ . In the right panels we can observe the effects of the ghost distance on position time series, and on the oscillation frequency: Closer to the ghost, more time is spent in the vicinity of the targets, and the oscillation frequency is lower.

The effects of ghost distance on the behavior of the system express the fundamental compromise in speed-accuracy trade-offs: A very small  $\dot{\theta}_{min}$  facilitates precision because the approaching speed is small, but dramatically degrades the speed of the movement. Too small values of  $\dot{\theta}_{min}$ , however, can halt oscillations in an infinite asymptotic approach to the targets. How, then, does the motor system deal with such a compromise? Figure 3.13 presents a sample time series of  $\dot{\theta}$  in a selected unimanual difficult trial to illustrate how the motor system

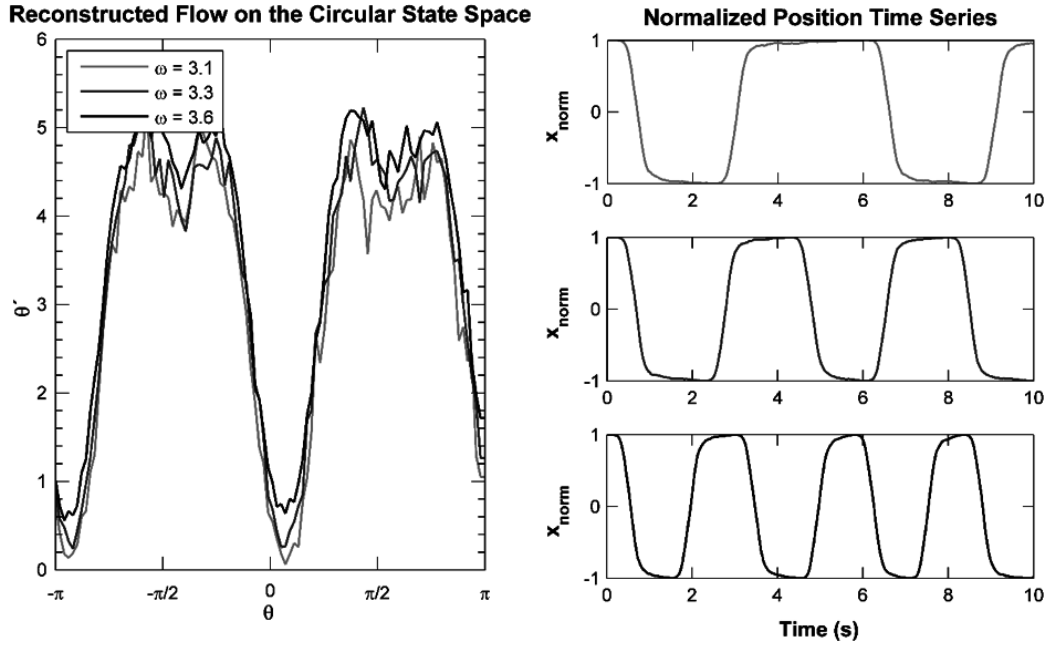


FIGURE 3.12 Effects of ghost distance on oscillation frequency for varying  $\omega$ . In the left panel, simulated flow on the circular state space for increasing values of  $\omega$  are plotted. In the right side panels, from top to bottom, the respective simulated time series of position for increasing  $\omega$  are plotted.

behaves in the vicinity of the targets. During the last third of the aiming movement, before reaching the target, the system is already under the slowing down influence of the ghost ( $\dot{\theta} < 1$ ). In that phase, participants consistently produced repeated fast pulses in  $\dot{\theta}$  that kicked the system away from the asymptote. One may argue that the adequate timing and intensity of these forcing processes is to be found in behavioral information specifying relevant properties of the ongoing relation between the participant and the task. In the present study we will not address the properties of such behavioral information. Instead, we include their effect in the previously given equations as external forces acting on an otherwise autonomous system:

$$-\dot{\theta} = \omega + \mu \cdot g(\theta) + I(t) \quad (3.11)$$

The control signals were implemented with Gaussian functions of activation as



per the following expression:

$$\begin{aligned} I(t) &= I_{max} \cdot e^{-\frac{(t-t_0-t_p)^2}{2\sigma^2}}, \text{ if } t - t_0 < t_{max} \\ I(t) &= 0, \text{ otherwise} \end{aligned} \quad (3.12)$$

where  $I_{max}$  is the maximum pulse intensity,  $\sigma$  is the pulse width,  $t_0$  the time of initiation of the pulse,  $t_p$  a constant displacement of the Gaussian function, and  $t_{max}$  the maximum duration of the pulse in seconds. Pulses were started in the phase interval between  $\pi/3$  before reaching a target, until the target is reached and the sense of movement reversed. Different pulses did not coexist to resemble the experimentally observed ones. The parameter values used to generate the pulses were:  $I_{max} = 2$ ;  $\sigma = .025$  s;  $t_p = 1.5 \sigma$ ;  $t_{max} = .15$  s. Finally, we included an additive Gaussian noise term in the differential equations with the following expression:  $\xi = \sqrt{Q} \cdot N(0, Q)$ , where  $Q$  is the noise intensity and  $N(0, Q)$  is a Gaussian distribution centered in zero with a standard deviation of  $Q$ . The value of  $Q$  used for the simulations was .5.

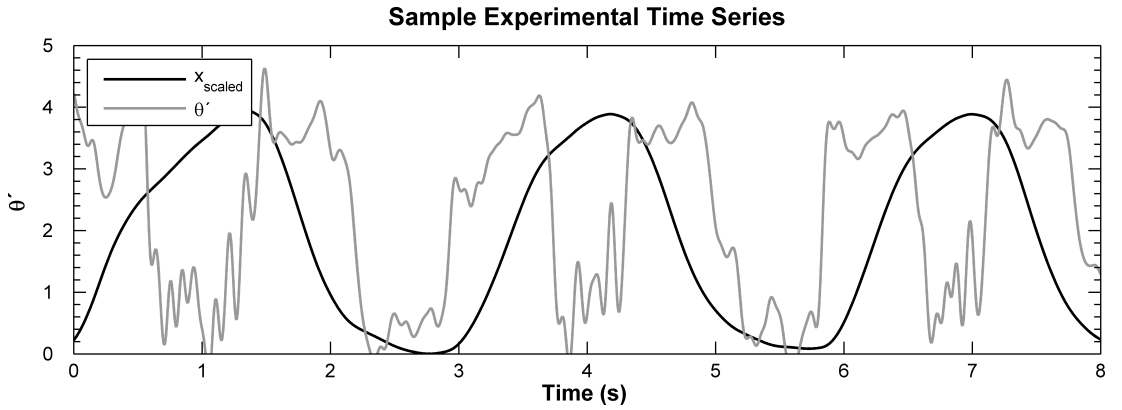


FIGURE 3.13 Detailed view of experimental position and  $\dot{\theta}$  series for a selected difficult trial. Position time series (black line) has been rescaled to match the range of  $\dot{\theta}$  (grey line) to facilitate the visualization of how different phases of movement relate with properties of  $\dot{\theta}$ .

### Synchronization of bimanual dynamics

The modelling efforts presented so far address the dynamics of movement control in a unimanual Fitts' task. The additional ingredient required to model bimanual dynamics is an appropriate coupling function. We have chosen a term that attracts the phase difference towards 0, that is, the sinus of the phase difference:

$$\begin{aligned}
-\dot{\theta}_1 &= \omega_1 + \mu_1 \cdot g_1(\theta_1) + \alpha \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) + I_1(t) + \xi(t) \\
-\dot{\theta}_2 &= \omega_2 + \mu_2 \cdot g_2(\theta_2) + \alpha \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1) + I_2(t) + \xi(t)
\end{aligned} \tag{3.13}$$

In these equations, the subscripts refer to the respective arms. To understand the effects of  $\alpha$  in the dynamics, and relate it with relevant properties of movement control, Figure 3.14 illustrates the effects of parameterizations of  $\alpha$  in the range (0, .9) on the  $\phi_{SD}$  of the simulated oscillations in the strongly and weakly coupled groups. The model parameters  $\omega$  and  $\mu$  were optimized against trials with easy and difficult subtasks performed during the first session. The features of the model discussed in this section were not altered by training. Because of the stochasticity of the model, we simulated each parameter configuration fifteen times to obtain a representative distribution for each point of the parameterization. Each dot in the scatter plot is the estimated value of  $\phi_{SD}$  for one simulation. The black horizontal line indicates the measured  $\phi_{SD}$  from the experimental data used for the parameter optimization. The grey line is the best fitting curve for the simulated  $\phi_{SD}$ . For the strongly coupled group, we used a negative exponential function, whereas for the weakly coupled group we used a quadratic function. The value of  $\alpha$  at the intersection between the experimentally measured and the simulated  $\phi_{SD}$  estimates the strength of the coupling required in the model to replicate the experimental behaviour.

We can verify in Figure 3.14 that the coupling term dramatically affects phase locking. Under strong coupling instructions, the oscillations are frequency locked, but small differences in the intrinsic properties of the oscillators accumulate if the coupling is removed. The  $\phi_{SD}$  reaches a value similar to the experimentally observed  $\phi_{SD}$  for intermediate strengths of the coupling term ( $\alpha \approx .3$ ). On the contrary, under weak coupling instructions, two different coordinative solutions produce phase locked polyrhythmic oscillators with a  $\phi_{SD}$  similar to the experimentally observed. In the first solution, the two oscillators are coupled with a relatively high strength ( $\alpha \approx .6$ ), thus continuously compensating for the accumulation of phase difference variations. In the other solution, the oscillators are decoupled ( $\alpha \approx 0$ ), and the now uncontrolled  $\phi(t)$  remains within a small range because the oscillators can be more homogeneous because they are not perturbing each other. The coupling coefficient that leads to the strongest phase locking, however, is found for intermediate values ( $\alpha \approx .3$ ). In sum, the shared timing ob-

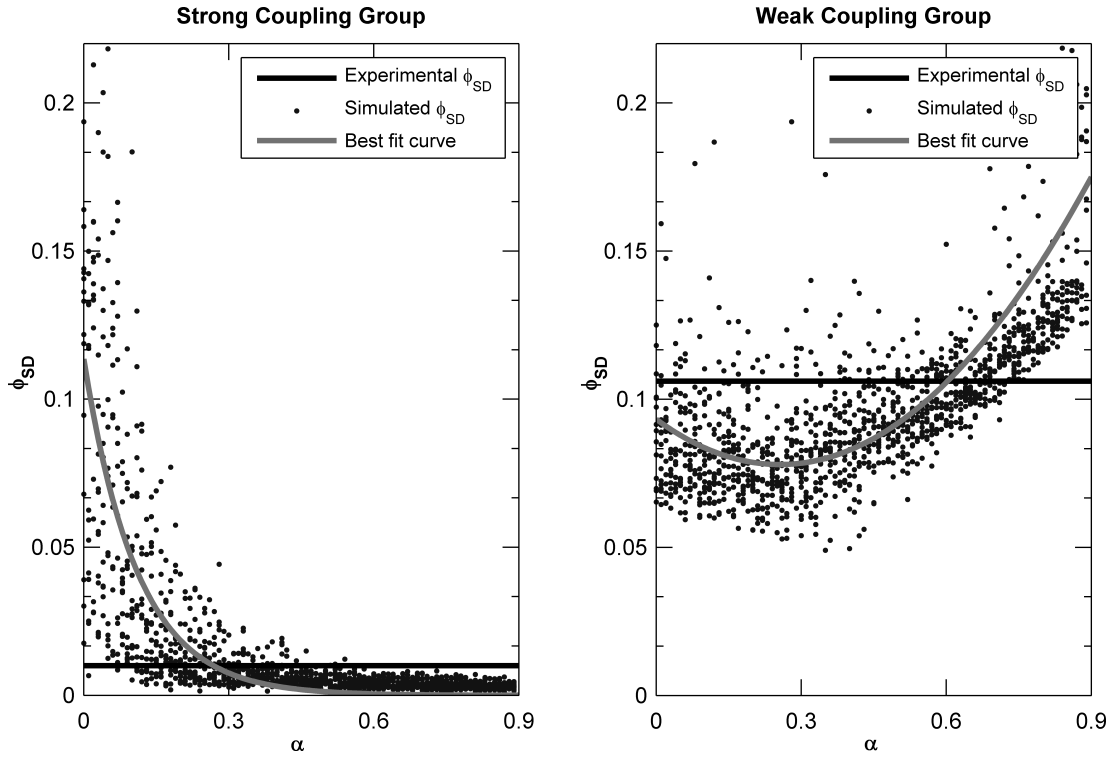


FIGURE 3.14 Scatter plots of the estimated  $\phi_{SD}$  for simulations with increasing coupling coefficient  $\alpha$ . Sample trials were chosen from the first session, with data from the strongly coupled group in the left panel and from the weakly coupled group in the right panel. In each figure, the black horizontal lines indicate the  $\phi_{SD}$  for the experimental data used for parameter optimization, and the grey curve indicates the best-fitting curve for the  $\phi_{SD}$  from the simulations as a function of the parameter  $\alpha$  (see text for details).

served in the strongly coupled group requires the configuration of similar enough oscillators and an intermediate coupling strength to cancel out the differences. The coordinative solution that we have labelled weakly coupled in our experimental design, can indeed be generated by either completely uncoupled but very precisely tuned oscillators, or by sustaining a very strong coupling between the limbs. In consonance with the well known fact that novices tend to freeze degrees of freedom whereas experts tend to synergistically couple the variability of their limbs' movements to keep invariant the relevant task variables, we can speculate that each of these possible coordinative solutions may correspond to different degrees of experience.

### Single trial simulation results

The purpose of this section is to verify the predictions of the model and to discuss the origin and consequences of several inaccuracies. The results presented in this section were obtained by simulating a representative trial from the weakly coupled group, in the third session and with large asymmetry between arms (the coupling parameter  $\alpha$  was set to zero for these simulations). Figure 3.15 presents the results for both arms (on the top panels the easy arm and on the bottom panels the difficult arm) for experimental and simulated data. The panels on the left present the reconstructed flow on the circular state space, whereas the panels on the right present the averaged and normalized time series of position and velocity during a single oscillation. Figure 3.16 presents a sample of the simulated and experimental time series of  $\dot{\theta}$ . As a first observation, let us note that only two parameters per arm were required to fit experimental data ( $\omega$  and  $\mu$ ); the remaining parameter,  $\alpha$ , was set to 0 to simulate a weakly coupled trial), and yet the model very accurately reproduced the experimental time series and all the kinematic, coordinative, and dynamic measures presented in Tables 3.1 and 3.2. There are, however, several divergences worth discussing.

An asymmetry between forward and backward movements can be observed in the state space of the easy arm (upper left panel, Figure 3.15). The target closer to the body is located at  $\theta = 0$ , and the further target is located at  $\theta = \pm \pi$ . The model predicts a symmetric maximum of  $\dot{\theta}$  on the targets, but the participant performed faster for  $\theta = 0$ . An account of this asymmetry in the model would complicate the mathematical expression of the model, without additional advantages. Thus, we focused on the symmetric case to provide a clearer picture of the main aspects of the observed patterns.

The removal of amplitude dynamics also has its consequences on the predictive power of the model. Phase dynamics are not affected, but the simulated time series of kinematic variables present several inaccuracies (see right panels of Figure 3.15). However, these inaccuracies vanish if we use the experimental amplitude to reconstruct the kinematic time series from the simulated time series of phase angles. Therefore, the dynamics of phase and amplitude are sufficiently independent in our task and our focus on phase dynamics does not reduce the explanatory value of the model.

Figure 3.16 illustrates the effects of two additional simplifications in our model. First, our exclusive focus on the reconstructed vector field to build a model for the

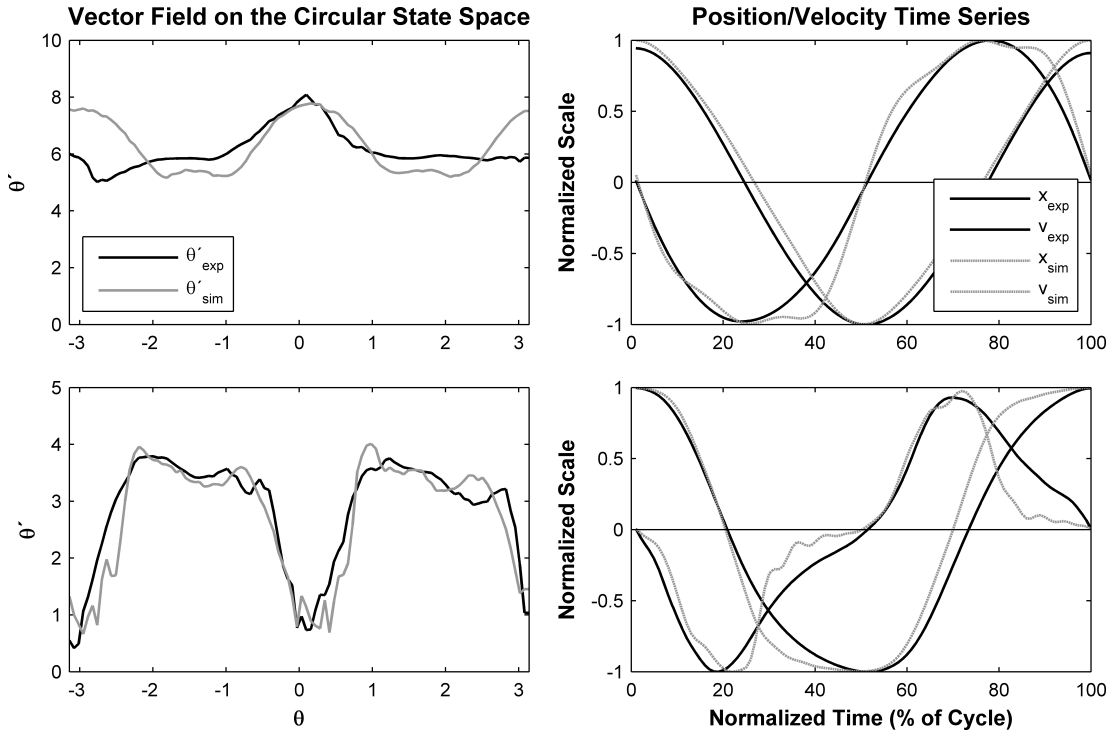


FIGURE 3.15 Fit of a representative large asymmetry trial under weak coupling instructions. In the left side of the figure we present reconstructed flow on the circular state space for the easy (upper plot) and difficult (lower row) subtasks in a bimanual tasks. The experimental (black line) and simulated (grey line)  $\dot{\theta}$  are plotted together to allow for comparison of model's accuracy. In the right side of the figure, we present the respective reconstructed averaged position and velocity per half cycle. Experimental data is plotted with solid lines, whereas the respective simulated data is plotted with dashed lines.

operative control in the task (the estimated drift coefficients) misrepresents the functional relevance of the diffusion term of the Fokker-Planck equation, which we did not use in this model. We replaced the experimental diffusion in our model with simulated Gaussian noise. A systematic account of the properties and functional roles of the diffuse term remains as an important open question. The use of vector field reconstruction to fit the model also discards information about the distribution of extreme events in the time series. In this trial, the easy arm had several events in which  $\dot{\theta}$  was extremely high, and the difficult arm had several movement reversals (changes in sign of  $\dot{\theta}$ ). A more detailed analysis of the probabilistic structure of these events could unveil unnoticed cross-correlations within and between oscillators (Wijnants, Cox, Hasselman, Bosman, & van Orden 2012). In addition, the temporal structure of the non-autonomous pulses is also stochastic, but we have not attempted to explicitly model it. We used, instead,

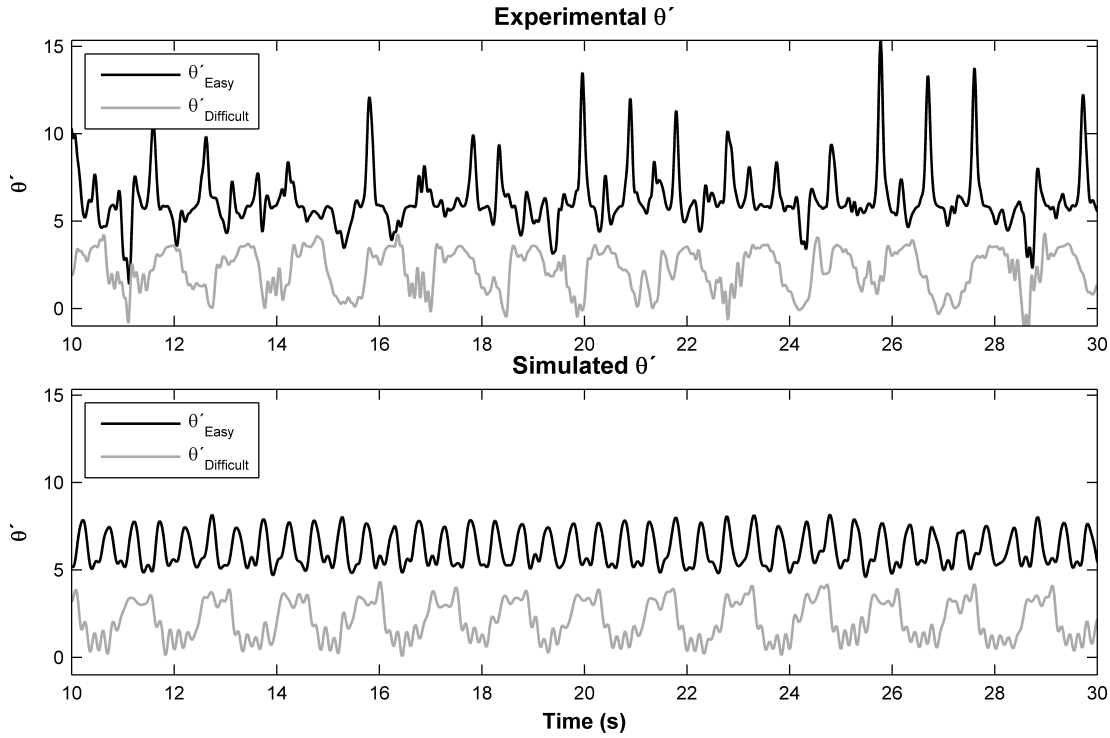


FIGURE 3.16 Experimental and simulated  $\dot{\theta}$  for both arms in a selected large asymmetry trial. Experimental data can be found in the upper row, and simulated data in the lower row.  $\dot{\theta}$  for the easy limb is plotted as a black line, whereas for the difficult limb a grey line is used.

a fixed temporal structure similar enough to the experimentally observed one. A deeper understanding of the distribution of non-autonomous pulses and how this distribution is affected by the task constraints and the behavioral information can provide new insights about the reciprocal constraints between perception and action in Fitts' task.

### 3.4 Discussion

Coordinating movements in a bimanual speed-accuracy trade-off is a complex task, as evidenced by the overall slower movement times and the higher proximity of the ghost attractor in the bimanual scenario. Nonetheless, participants managed to improve performance with practice, closing the gap between bimanual and unimanual tasks. When participants were requested to perform the task as two independent movements, a different control problem arises, a much more difficult to master one. As a consequence, participants instructed to release the

strong coupling had problems to perform the task and, by default, they tended to perform a strongly coupled coordinative pattern. It took six sessions of training the task to have four out of five participants performing polyrhythmic oscillations in at least one asymmetric condition. However, a participant with previous experience in juggling managed to reduce coupling from the first session in all asymmetric conditions, without previous training.

In the strongly coupled group both phase and frequency locking are maximum in all conditions because the control of the arms is merged in a single dynamical entity. Synchrony is the product of a shared timing between movements, and not the opportunistic addition of initial and final asynchronies to the easier movement to compensate for their differences in MTs, as observed in discrete tasks (Kelso et al., 1979; Riek et al., 2003). In contrast, a weakly coupled coordinative solution provides the necessary plasticity to obtain complex coordination patterns. We observed that typical frequency locking ratios in the polyrhythmic movements were 1:2, 1:3, and 2:3 for trials with small asymmetry between tasks, and 1:3, 1:4, and 1:5 for trials with large asymmetry between tasks. These values increased with practice. The strength of the frequency locking was obviously smaller (there is no stronger locking than merging with the other), but participants still achieved relatively high values of frequency locking strength considering the difficulty of controlling a weakly coupled strategy. Coordination in phase is an important feature of movements in this task because it reduces the perceptual difficulty of the task by appropriately distributing the “information-hungry” phases of each arm’s movements in time and space (Fernandez & Bootsma, 2004; Riek et al., 2003). We indeed observed that participants took advantage of phase locking by controlling the relative phases of the arms even when they intend to perform independent movements. Phase locking was smaller in the weakly coupled group, but significantly different from zero in all asymmetric conditions.

Each of these coordinative solutions to the task constraints entails a reorganization of movement control that affects all relevant kinematic, dynamic, and coordinative properties of the movements. A strongly coupled coordination constrains the arms to move as a single entity. As a consequence, the more difficult task acts as a bottleneck for the joint movement, and the arm faced with the easier task shows properties typical of the more difficult task: It moves slower (and with smaller peak velocity and acceleration quotient), it spends more net energy per cycle and its control system is closer to the ghost attractor. On the contrary,

a weakly coupled coordination stresses the development of independent control for each arm, releasing the functional constraints of the difficult arm over the easy arm. Thus, compared to the strongly coupled scenario, the arm facing the easier task moves faster (and with higher peak velocities and acceleration quotients), it spends less net energy per cycle, and is driven by autonomous limit cycle dynamics. The relative performance in bimanual with respect to unimanual tasks consolidates this evidence. For positive or symmetric  $ID_{\text{diff}}$ , all the variables measured in the bimanual movements are similar to their unimanual counterparts in the two groups. However, for negative  $ID_{\text{diff}}$ , the bimanual performance of the strongly coupled group decreases with respect to the unimanual task and practice similarly affects bimanual and unimanual movements. The opposite is true for the weakly coupled coordination: the bimanual performance is closer to the unimanual one, and practice further decreases their differences. In sum, the ipsilateral task constrains bimanual and unimanual movements in similar ways regardless of the performed coordinative solution, but the contralateral task acts as a bottleneck for the combined movements (almost) only when the movements are synchronous. We have proposed a bimanual analogue to the well-known Fitts' law that summarizes these effects.

Previous applications of Fitts' law to bimanual tasks used variations in the task conditions of one of the limbs at a time. As a consequence, the interactions between the two tasks were not accessible. To this end, we simultaneously and systematically varied the accuracy constraints for both limbs. To formalize the relationships between MT and accuracy constraints in a bimanual Fitts' law we chose an exponential formulation because it requires less parameters than the logarithmic version, and these parameters can be meaningfully interpreted in terms of task constraints. We used the quotient  $D/W$  to measure the task complexity (a dimensionless index of accuracy;  $W$  = effective target width), which is related to MTs by a power law (see Equation 3.5). The coefficient  $a$  estimates the MT required for a movement of amplitude  $D$  without precision constraints in a specific experimental setup. The value of this parameter is higher for the weakly coupled group. The exponents  $b$  and  $c$  measure the intensity of the dependence of MT on the index of accuracy. In strongly coupled trials, the exponents for both arms are high and with similar values. In weakly coupled trials, the ipsilateral exponent is twice as high (as the exponent for the other group), and in addition, the contralateral exponent is not significantly different from 0, thus simplifying the



expression to a unimanual law with a higher constant term. Contrary to discrete bimanual tasks, where movements were synchronized by opportunistically compensating initial and final asynchronies (Riek et al., 2003), in continuous tasks synchronicity entails a genuinely shared timing between the movement of the two limbs. To better inspect the temporal structure and functional features of movement control we next proposed a model of phase dynamics.

The dynamical analysis of phase angles revealed important effects of task constraints on the operative control mechanism. Using phase flow reconstruction, we obtained a minimal expression of the dynamics of  $\theta$  to model the behavior of the control system. The model postulates that a common invariant dynamics underlies the control of movements constrained by speed-accuracy trade-offs. These invariant dynamics are composed of two oscillatory modes whose effects can be measured at the first two harmonics of the movement frequency. The composition of these harmonics yields the required asymmetry in the phase flow at the different stages of the movements. All the possible timings and phase relationships between these two processes (that is, their interference patterns) can be parameterized with two values ( $a$ , an asymmetry parameter, and  $b$ , a translational parameter, in Equation 3.7). Thus, difficult and easy tasks are dealt with by setting different timings and phase relationships between the harmonic components. In easy tasks, phase flow is maximal above the targets, and minimal between targets, whereas in difficult tasks, the pattern is the opposite: Phase flow is minimal above the targets, and maximal between targets. However, the interaction between the harmonic components of  $\dot{\theta}$  is the same in both conditions: They interact constructively (summing up their effects) above the targets and destructively (cancelling out their effects) in between targets, although in easy tasks the constructive interactions happen in crests (thus, with very high resultant flow) and in difficult trials in valleys (thus, with very low resultant flow).

The invariant non-linear term is complemented by a constant term,  $\omega$ , which is equivalent to the average phase velocity if  $\omega$  is much bigger than the minimal value of the non-linear term. This difference determines the topology of the phase flow. If the difference is negative, the phase flow is composed of two fixed points per aiming movement (one stable and one unstable). This topological class corresponds to a discrete control system and requires external kicks to move it away from a stable state towards a different fixed point, effectively generating the movements in the transition. However, this kind of control was not observed in

our experiment. If the difference is positive but only slightly bigger than zero, the system asymptotically approaches a ghost attractor generated by the nearness of a saddle node bifurcation.

The effects of the ghost distance on the dynamics can be used to express the fundamental compromise in speed-accuracy trade-offs: A small distance facilitates precision because the approach speed is small, but it increases the MT. Too small distances can even halt the oscillations in an infinite asymptotic approach to the targets. In the here-advanced portrayal, to overcome the speed-accuracy dilemma the motor system produces repeated fast pulses in  $\dot{\theta}$  that kick the system away from the ghost. These forcing processes should be supposed to be autonomously specified by behavioral information of the ongoing interaction with the environment. However, we included their effects in our model as external forces acting on an otherwise autonomous system. This kind of control system operates in difficult tasks. Finally, if the difference is positive and bigger than 1, the phase flow is continuous around the circular topology. Despite the heterogeneity in phase flow imposed by task constraints, the generated movements tend towards being harmonic, and the control system operates in a fully autonomous way. In our experiment, this type of control was operative in movements constrained by low indexes of accuracy.

We modeled the coordination between oscillators using the sinus of the phase difference as the coupling term. We studied the effect of the coupling term on phase locking by parameterizing different models along a wide range of values of  $\alpha$  (i.e., the weight of the coupling term in the model). Under strong coupling instructions, oscillation are 1:1 locked, but small differences in the intrinsic properties of the oscillators accumulate without coupling. The  $\phi_{SD}$  decreases with progressively higher coupling strengths. An intermediate coupling strength ( $\alpha \approx .3$ ) yields values of  $\phi_{SD}$  similar to the experimental ones. Under weak coupling instructions, phase locked polyrhythmic oscillations similar to the experimental ones are generated by two coordinative solutions: Either the oscillators are strongly coupled ( $\alpha \approx .6$ ), or they are decoupled ( $\alpha \approx 0$ ). The optimal coupling strength (with lower  $\phi_{SD}$  than the experimentally observed), however, is found for intermediate values ( $\alpha \approx .3$ ). It is tempting to speculate that there is a relationship between the coordinative solution and the skilfulness of the participant. For example, it could be the case that the first solution corresponds to novices, which need tightly coupled oscillations to control the task, whereas experts may

perform the task by an appropriate configuration of the autonomous oscillations controlling each arm.

The perspective that our model brings to the understanding of motor control under speed-accuracy constraints contrasts with previous mechanistic models of Fitts' task, such as the deterministic iterative-corrections model (Keele, 1968), the impulse variability model (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank, & Quinn, 1979), or the stochastic optimized sub-movements model (Meyer, Smith, Kornblum, Abrams, & Wright, 1990). These models focus their attention on the properties of corrective movements (equivalent to the non-autonomous pulses in our model). A feature common to all of them is the consideration of aiming movements as composed of a set of sub-movements whose endpoints are progressively closer to the target. Thus, the motor system starts by planning in advance a motor command to perform a ballistic first movement that is too short to reach the target, and subsequently plans the following corrective sub-movements based on the perceptual feedback generated in the previous movements until the target is reached. On the contrary, our modelling perspective stresses that task constraints operate on the global balance between stability (the attractiveness of the ghost) and plasticity (the perturbations exerted by pulses) of the dynamics. Our portrayal considers movement control as a dynamically autonomous process in the ecological scale of the organism and its environment. Skilled movements emerge in the mutual constraints between perception and action within the intentional context laid out by the task and its goals. Once a goal-path is selected, an ecologically lawful and dynamically autonomous information-control loop provides the means for the action to achieve the intended goals.

In its present form, however, our model requires two non-autonomous processes to account for the movement dynamics under speed-accuracy trade-offs: the pulses to compensate for the attractiveness of the ghost and the Gaussian noise to simulate the diffusive processes. A principled account of these non-autonomous processes would constitute an essential improvement of the model, and be important for a proper understanding of motor control more in general. Lawful explanations of the timing and intensity of the pulses are to be found in a process of prospective informational specification within the autonomous perception-action loop. A relevant example of the application of the ecological information-control approach is the control of cart pole balancing using prospective optical information in the form of fractional derivatives of the pole angle

(Jacobs, Vaz, & Michaels, 2012). The fractional derivative contains prospective information that directly specifies the force to be applied now using delayed information. With respect to the Gaussian noise, relevant information to understand motor control in Fitts' task is lost if we discard a more detailed account of the diffusion processes (Wijnants et al., 2012). Long range correlations are the hallmark of the operation of complex self-organized systems (Diniz et al., 2010). Within our framework, long range correlations are indicative of the nested scales of constraints that operate in the co-specification of perception and action and, thus, they are essential to understand the unfolding of behavior.

---

## Chapter 4

# Perception as a Dynamical System

Learning can be portrayed as a movement in a state space. Potential-based explanations of such movements hold that learners use a gradient-descent process to minimize a potential function. Direct explanations hold that learning is specific to information for learning. The present study contrasts specific hypotheses derived from these general approaches. Participants estimated the length of arrow shafts of Müller-Lyer displays. Experiment 1 shows that learning in this paradigm can indeed be portrayed as a movement in a state space. In Experiment 2 non-veridical feedback was used in such a way that the contrasted hypotheses predicted learning in opposite directions. No learning was observed. In Experiment 3, movements in the state space were observed with practice conditions in which one of the hypotheses specified a movement in the state space while the other did not specify any movement. A tentative explanation for these findings is that both hypotheses are partly correct. However, more than to the empirical findings for this particular task, the authors wish to draw attention to the distinction between potential-based and direct processes—a distinction that they consider of general importance for the understanding of learning.

## 4.1 Introduction

Biological systems continuously adapt. The current state of a biological system is therefore a function of how the system adapts and of the environment to which it adapts. The implication for a lawful understanding of such systems (Turvey & Carello, 1986) is that laws of perceiving and acting are subject to change due to laws of learning. A more general implication is that an understanding of perceiving and acting entails an understanding of adapting and learning (Fajen, 2008). The present study approaches the issue of learning and adapting from the dynamical systems perspective. In this perspective the evolution of systems is described as a state-dependent movement in a space (Strogatz, 1994). To formulate our question we need to introduce the notions of state space, gradient, and potential function.

A state space is a space that describes all possible states of a system (Warren, 2006). Each point in the space represents a state of the system and each state of the system is represented by a point in the space. The purely mathematical theory of dynamical systems is concerned with mathematical properties of spaces and of the way in which systems move in the spaces. The mathematical framework can be applied in physics by giving the state space a physical interpretation (Calvo Garzón, 2008). To give an example, each point in a state space might represent the position and velocity of an object. In that case studying how the system moves in the space means studying how the position and velocity of the object evolve over time. Likewise, the mathematical framework of dynamical systems can be applied in psychology by giving the state space a psychological interpretation.

The evolution of a system in a state space can be described with a vector field or with a function on the state space (Strogatz, 1994). This is illustrated in Figure 4.1. The horizontal plane in the figure is a two-dimensional state space. The vector field describes the evolution of a system if the system, when localized at a point in the space, moves in the direction of the vector at that point and with a speed equal to the magnitude of that vector. The surface describes the evolution of the system if the system moves in the direction of the steepest decrease of the surface with a speed that is equal to the steepness of the surface in that direction. Note that if both the surface and the vector field describe the evolution of the system, then the vector field must specify the direction of the steepest decrease of the surface. In that case the function that defines the surface is referred to as a potential function of the system and the vector field is referred to as the gradient

of the potential function.<sup>1</sup>

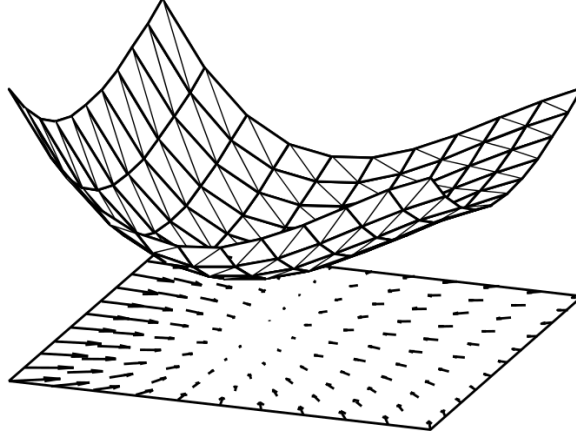


FIGURE 4.1 Example of a two-dimensional state space (horizontal plane), a potential function (curved surface), and the gradient of the potential function (vector field).

We assume that learning can be portrayed as an approximately continuous movement in a state space and that this movement can be described both with a potential function and with a vector field. Our question is: How does a system move in the space the way it does? Is the movement based on the potential function or on the vector field? Or, more precisely, does information represented by the potential function or information represented by the vector field have a causal role in the learning? This question is relevant to all types of learning that can be portrayed as a continuous movement in a state space.

A first approach, referred to as *potential-based approach*, assumes that the system detects information about the value of the potential function at the point in the space at which the system is localized. It is further assumed that the system can sample the potential function at a few points in a small neighborhood, estimate the gradient of the potential function on the basis of these samples, and move in the direction indicated by the estimated gradient. Hence, for this type of learning, the system detects a single-dimensional quantity (the value of the potential function) at multiple points in the space.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>In mathematical terms the relation between a potential function and its gradient can be expressed as follows. If a state space is defined with the coordinate variables  $x_1, \dots, x_n$ , and the potential function is given by  $f(x_1, \dots, x_n)$ , then the gradient, typically denoted by  $\nabla f$ , is given by  $\nabla f = -(\frac{\delta f}{\delta x_1}, \dots, \frac{\delta f}{\delta x_n})$ . In other words, the gradient can be computed from the partial derivatives of the potential function with respect to the state variables.

<sup>2</sup>We have previously referred to this approach as gradient-based approach (Jacobs, Silva, & Calvo, 2009, p. 268; cf. Michaels, Arzamarski, Isenhower, & Jacobs, 2008).

A second approach—meant to explain similar movements in the space—assumes that change in the system is specific to what we refer to as *information for learning* (Jacobs & Michaels, 2007). This means that the system, when localized at a single point, is able to detect an informational quantity that specifies the vector of the vector field at that point. The dimension of the detected quantity is thus hypothesized to be identical to the dimension of that vector, which is the dimension of the space itself. Note the contrast with potential-based learning: In this second approach the detected quantity can be multidimensional (cf. Fowler & Turvey, 1978). Given that the system directly detects the required change in the system, represented by the vector, it does not need to sample a hypothetical potential function at multiple points in the space. We refer to this second approach as the *direct or vector-field-based approach* (e.g., Jacobs et al., 2009).

To provide further intuitions about the potential-based and direct approaches we briefly consider the theory of ordinary differential equations. Imagine a state space with  $n$  coordinate variables,  $x_1, \dots, x_n$ . Movements in the space can be defined with  $n$  temporal derivatives,  $\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n$ . Direct learning means that the learning system maintains these derivatives specific to information for learning, for instance as indicated in the following example:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= g_1(I_1), \\ &\dots, \\ \dot{x}_n &= g_n(I_n).\end{aligned}$$

In these equations the  $g_i$ s are single-valued functions. In direct learning the movement in the state space is thus guided by information for learning, here indicated by the  $n$ -dimensional quantity  $I = (I_1, \dots, I_n)$ . According to the direct approach potential functions might be assumed to exist but they are not assumed to have a causal role in the learning. According to the potential-based approach this is the other way around: Although information for learning might exist, the value of the potential function is hypothesized to be detected and to have a causal role in guiding the movement in the space.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>It might be interesting to mention the following. For ecologically representative tasks the assumption that information for learning exists should be expected to be feasible only if one assumes this information (1) to be extended over space and time and (2) to be apparently complex. Apart from this general expectation, in the present study we prefer to make as few task-independent assumptions as possible about the nature of the  $I_i$ s and  $g_i$ s in the system of equations. For speculative and critical remarks concerning more general equations we refer the reader to Jacobs et al. (2009, p. 284). Also note that in some cases direct learning is



Several studies have been reported that test and elaborate aspects of the direct learning approach (Arzamarski, Isenhowe, Kay, Turvey, & Michaels, 2010; Jacobs et al., 2009; Michaels et al., 2008). These studies indicate that learning can be portrayed as an approximately continuous movement in a state space, at least in some cases. The state spaces considered in these studies are typically information spaces, meaning that each point in the space represents an informational variable. Michaels and Isenhowe (2011) related the notion of information space to the notion of action space, and they showed that this allows an empirical contrast of approaches based on the notion of information space to approaches such as Bayesian and other cue-combination approaches. None of these studies, however, was designed to contrast potential-based and direct movements in information spaces. The aim of this article is to explore such a contrast.

The goal of our broader research project is to achieve a theory of learning as it occurs in ecologically relevant situations. Even so, for the present study we chose to use a more restricted laboratory task: the Müller-Lyer illusion. Participants practiced with feedback to judge the length of the shaft of double-headed arrows. The main advantage of this task is that it is relatively easy to derive contrasting predictions from the different approaches (see Experiments 2 and 3). Our hope is that the methodology explored in this article will prove to be applicable also to more ecologically relevant tasks. We next describe the Müller-Lyer task in more detail.

Figure 4.2 shows two double-headed arrows. Below each arrow is a horizontal line segment that represents a length judgment. Length judgments must be based on detectable informational variables. Informational variables that can be defined for Müller-Lyer displays include the veridical length of the shaft (or the visual angle subtended by the shaft at the point of observation) and the distance between the centroids of the triangles formed by the arrowheads (or the angular distance between the centroids). Many in-between variables can be defined. For instance, observers could base their judgments on the distance (angle) between the horizontal midpoints of the arrowhead triangles, a distance that is slightly shorter than the centroid-to-centroid distance for open arrowheads and slightly longer for closed arrowheads.

One can represent such variables in a one-dimensional space defined with the

---

better described with difference rather than differential equations (e.g., Equations 7, 9, and 11 in Jacobs et al., 2009).

coordinate  $y$ , associating  $y=0$  to the variable shaft length,  $y=1$  to the variable centroid-to-centroid distance, and in-between coordinates to in-between variables. This gives us a space each point of which represents an informational variable. Given that the space refers to informational variables such a space can be referred to as variable space or information space (Jacobs & Michaels, 2007). Points in information spaces for more ecologically relevant tasks should be expected to represent variables that are more apparently complex than the simple ones in our Müller-Lyer example. For this reason we here use the term variable space rather than the more theory-loaded term information space (cf. Jacobs et al., 2009, p. 273).

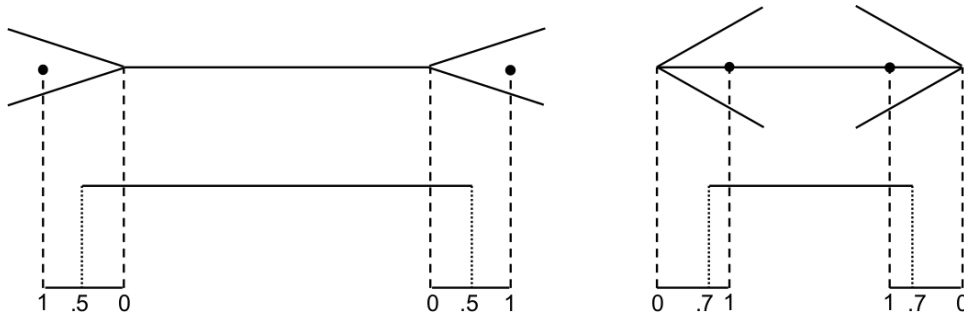


FIGURE 4.2 [Illustration of the estimation of used informational variables. Top: Müller-Lyer display with open (left) and closed (right) arrowheads. Middle: Continuous horizontal line segments that represent hypothetical length judgments. Bottom: Estimation of used informational variable (see text for detail).

The dotted segments (vertical) in the middle/lower part of Figure 4.2 together with the short segments (horizontal) in the lower part of the figure illustrate how one can determine the informational variable, or  $y$ -locus in the space, that was used on a particular trial. For the left-side arrow, the  $y$ -coordinate that best predicts the judgment is .5, meaning that the judgment lies exactly between the prediction of the real length of the shaft and the centroid-to-centroid distance. The  $y$ -coordinate for the right-side judgment is .7, meaning that the estimate lies slightly closer to the centroid-to-centroid distance. Rather than graphically, one can also determine the  $y$ -coordinate of the used variable with the following equation:

$$y = \frac{judgment - length_{shaft}}{distance_{centroids} - length_{shaft}} \quad (4.1)$$

This equation associates the coordinate  $y=0$  to judgments based on the veridical

shaft length (for such judgments the numerator is zero), and it associates the value  $y=1$  to judgments based on the distance between the centroids. Likewise, the equation associates values between 0 and 1 to judgments based on in-between variables.

Preliminary analyses with Equation 4.1 indicated that individuals often use variables represented by  $y$ -values between 0 and 1, but that outliers occur. To reduce the effect of outliers on subsequent analyses we used a sigmoidal coordinate change:

$$x = \frac{1}{1 + e^{-4(y-.5)}} \quad (4.2)$$

This transformation maps the  $y$ -values 0 and 1, which represent the variables veridical shaft-length and centroid-to-centroid distance, to the  $x$ -values .12 and .88. Values between  $y=0$  and  $y=1$  are mapped to  $x$ -values between .12 and .88. Finally, and this is why we used the transformation,  $y$ -values lower than 0 are mapped to  $x$ -values between 0 and .12 and  $y$ -values higher than 1 to  $x$ -values between .88 and 1.

To summarize, the state space, or variable space, used in the present study is described by Equations 4.1 and 4.2. The coordinate of the space is  $x$ . To determine the used informational variable, or  $x$ -locus, from a judgment one first applies Equation 4.1 and then Equation 4.2. Likewise, to determine the judgment that is predicted by a locus in the space, for a particular stimulus, one first applies the inverse of Equation 4.2 and then the inverse of Equation 4.1. Knowing the judgment that is predicted by a particular  $x$ -value, for a particular stimulus, one can easily compute the predicted error (i.e., the judgment minus the actual shaft length). This allows us to derive testable hypotheses from the potential-based and direct approaches. Before doing so we address a traditional ecological interpretation of illusions and perceptual errors.

Reliance on the variable  $x=.12$  in our space can lead to judgments that are correct if being correct is measured with regard to actual shaft length. Likewise, judgments based on variables other than  $x=.12$  can be said to be erroneous or illusory if they are evaluated with regard to shaft length. Perception and action, however, should typically not be evaluated with regard to standard physical quantities such as shaft length. If a scientist measures performance on the basis of a standard physical property and claims that the perceiver is in error, then, rather than the perceiver, it might be that “the *scientist is in error*—that is,

he or she is measuring the wrong thing” (Michaels & Carello, 1981, p. 92; cf. Turvey, Shaw, Reed, & Mace, 1981, p. 279 and further). In sum, although in the following we do refer to a discrepancy between judgments and shaft length as error, we are aware that this terminology is questionable. Our search for which  $x$ -loci best explain participants’ performance can also be interpreted as a search for which physical measurement should be used to evaluate performance. We now turn to testable hypotheses for the potential-based and direct approaches, starting with the potential-based approach.

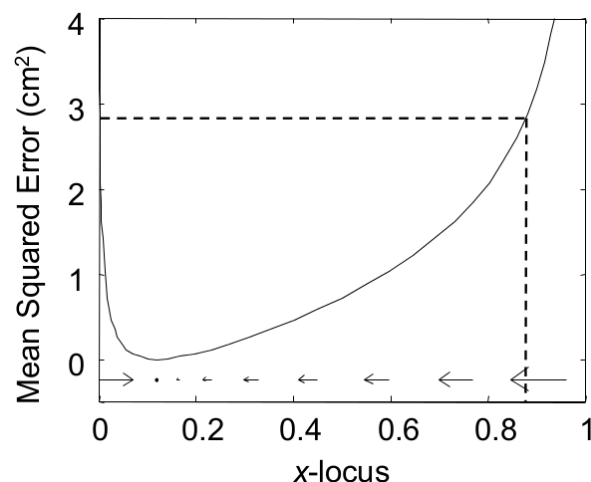


FIGURE 4.3 Predicted mean squared errors and directional errors by the use of different  $x$ -loci. Mean squared errors (continuous curve) and directional errors (vector field) predicted by the use of the different informational variables ( $x$ -axis). The dashed segments indicate the mean squared error predicted by the variable centroid-to-centroid distance ( $x=.88$ ).

The horizontal axis of Figure 4.3 is the just-defined variable space. The continuous curve gives the mean of the squared errors of judgments based on the variables in the space. The curve gives the mean squared error predicted for the stimuli used in the practice phase of Experiment 1 (for Groups 2 and 3; look ahead to the method section of that experiment). If, for instance,  $x=.88$ , meaning that the observer uses the centroid-to-centroid distance, then the mean of the squared errors is predicted to be  $2.85 \text{ cm}^2$  (as illustrated by the dashed segments in the figure). Observers who receive feedback can detect the mean of the squared errors. They might be able to sample the measure at multiple points in the space and compute the gradient from these samples. The measure might hence serve as potential function for a potential-based learning process.

The vector field shown in Figure 4.3 represents the mean directional error predicted by the use of the informational variables. The vectors point to the

left (right) if this mean error is positive (negative); the length of the vectors is proportional to the average magnitude of the error. The directional error is the error in the direction of the arrowhead: The error is positive if displays with open arrowheads are overestimated and if displays with closed arrowheads are underestimated, and negative otherwise. To compute these errors we again used the stimuli presented in the practice phases of Groups 2 and 3 of Experiment 1. The mean directional error, which can be detected without sampling multiple points in the space, specifies a direction and a magnitude of a change in variable use and can hence be used as information for learning for a direct learning process.<sup>4</sup>

The following experiments are organized as follows. In Experiment 1 we aim to establish that learning occurs in the Müller-Lyer paradigm and that this learning implies a movement in our candidate variable space. Then, in Experiments 2 and 3, we address predictions derived from the potential-based and direct approaches.

## 4.2 Experiment 1

The purpose of Experiment 1 is to test to what extent learning occurs in the Müller-Lyer paradigm and to examine if this learning can be portrayed in dynamical terms as movement in a variable space. We used a pretest-practice-posttest design. In the practice phase veridical feedback was given. Participants were divided into three experimental groups for which slightly different experimental conditions were used. The groups differed in the number of practice trials, the lengths of the stimuli, and the type of feedback that was used. These group variations were introduced to explore whether more learning is observed for some conditions than for others.

---

<sup>4</sup>The potential function and vector field illustrated in Figure 4.3 were computed as means over all trials used in the practice phase of Groups 2 and 3 of Experiment 1. To effect trial-to-trial steps in the variable space, however, one should assume that observers use means detected over fewer trials, or perhaps even error values detected on a single trial. We refer the reader to Figures 7 to 9 of Jacobs et al. (2009) and the text related to these figures for a speculative attempt to reveal the number of trials that are used to detect information for learning and information for calibration. The present study does not address this question.

### 4.2.1 Method

#### Participants

Fifty-six students of the Autonomous University of Madrid participated in the experiment. Their age ranged from 19 to 29 years with a mean of 21.3 years. Participants received a 2-gigabyte pendrive for their participation. Twenty participants were assigned to Group 1 and 18 each to Groups 2 and 3.

#### Apparatus

Stimuli were presented on a 17-inch thin-film transistor (TFT) monitor at a distance of 50 cm from the seated participants. A chinrest was used to stabilize the head of participants. Responses were registered with a keyboard.

#### Stimuli and design

The pre- and posttests consisted of 30 trials for each group. The practice phases consisted of 30, 50, and 60 trials, respectively, for Groups 1 to 3. The stimulus consisted of a black double-headed arrow presented in the middle of the screen on a white background (look ahead to Figure 4.4). The length of the shaft was randomly chosen on each trial; for Group 1, the length was chosen from an interval between 2 and 8 cm and for Groups 2 and 3 from an interval between 6 and 8 cm. The length of the segments that formed the arrowhead was one third of the length of the shaft. The angle between the shaft and the arrowhead segments was randomly chosen from an interval between  $\pi/6$  radians (closed arrowheads) and  $5\pi/6$  radians (open arrowheads); an angle of  $\pi/2$  corresponded to vertical arrowhead segments. Participants were asked to adjust a response gauge that was presented in one of the corners of the screen. The length of the gauge was increased with the right-arrow key and decreased with the left-arrow key. The center of the gauge did not move; increases and decreases occurred symmetrically on both sides of the segment, in steps of 5 pixels (.17 cm) per side. When a participant judged the length of the gauge to be equal to the length of the stimulus, he or she confirmed the judgment with the down-arrow key. The initial length of the gauge was chosen randomly on each trial from an interval between 1 and 11 cm.

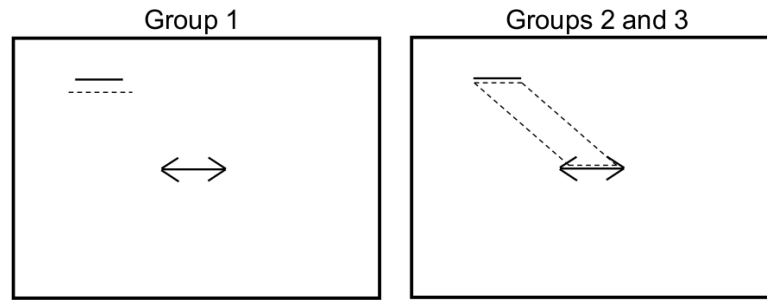


FIGURE 4.4 Stimulus (double-headed arrow), response gauge (continuous line segment), and feedback (dashed line segments) used in Groups 1 to 3 of Experiment 1. Dashed lines in the figure were presented as continuous red lines in the experiment.

### Feedback

In the pretest and posttest, confirming a judgment immediately led to the following trial. In practice trials feedback was given after the judgment was confirmed. For Group 1 the veridical length of the shaft was indicated by a red line segment (dashed line in left panel of Figure 4.4). The segment appeared below the response gauge if the gauge was presented in the upper-left or upper-right corner of the screen and above the gauge if the gauge was presented in the lower-left or lower-right corner. For Groups 2 and 3 the feedback consisted of a red parallelogram (right panel of Figure 4.4). The length of the horizontal segments of the parallelogram was equal to the final length of the gauge, allowing participants to see the error made on that trial. For all groups, the double-headed arrow, the gauge, and the feedback disappeared when the participant pushed the down-arrow key a second time. This also initiated the following trial. Finally, for Group 3, the average errors in cm for that block and for previous blocks were displayed numerically after each block of trials.

## 4.2.2 Results

### Absolute error

The upper part of Table 4.1 presents the proportional absolute errors observed in this experiment. The proportional absolute error is the absolute error divided by the length of the shaft. The table gives these errors averaged per test phase and experimental group. An ANOVA was performed on the errors with Test Phase (pretest, posttest) as within-subjects factor and Group (1, 2, 3) as between-subjects factor. The main effects of Test Phase and Group were significant:

$F(1,53)=10.1$ ,  $p<.01$ ,  $\eta_p^2=.16$ , and  $F(2,53)=5.1$ ,  $p<.01$ ,  $\eta_p^2=.16$ , respectively. The errors were lower after practice than before and they were lower for Groups 2 and 3 than for Group 1. The larger proportional errors in Group 1 might have been due to the fact that shorter shafts were used in this group, because shaft length is the denominator of the proportional error. The interaction was not significant:  $F(2,53)=.25$ ,  $p=.78$ .

TABLE 4.1  
Mean proportional absolute errors and  $x$ -loci for Experiment 1

<i>Group</i>	<i>Pretest</i>	<i>Posttest</i>
Proportional absolute error		
1	.136 (.047)	.124 (.044)
2	.110 (.022)	.103 (.019)
3	.108 (.032)	.094 (.018)
$x$ -Locus		
1	.482 (.104)	.397 (.077)
2	.453 (.058)	.408 (.059)
3	.409 (.094)	.362 (.080)

Note: Values within parentheses are standard deviations

### Informational variables

The lower part of Table 4.1 presents the mean  $x$ -loci, which indicate the informational variables that were used. An ANOVA was performed on these loci with Test Phase (pretest, posttest) as within-subjects factor and Group (1, 2, 3) as between-subjects factor. The effect of Test Phase was significant:  $F(1,53)=23.6$ ,  $p<.001$ ,  $\eta_p^2=.31$ . This means that, with practice, individuals changed in variable use and came to rely on the more useful ones. The effect of Group was also significant:  $F(2,53)=3.4$ ,  $p=.04$ ,  $\eta_p^2=.11$ ; the values in the table indicate that the  $x$ -loci were slightly lower for Group 3. The Test Phase  $\times$  Group interaction was not significant:  $F(2,53)=1.1$ ,  $p=.33$ .

### 4.2.3 Discussion

The main purpose of this experiment was to test whether learning occurs if feedback is given about length estimates in Müller-Lyer displays. The decrease with



practice in proportional absolute error shows that this is the case. Furthermore, the observed decrease in  $x$ -locus indicates that the learning can be portrayed as movement in a variable space. As illustrated in Figure 4.3, the observed leftward movement in the space is consistent with the potential-based hypothesis as well as with the direct hypothesis.

An additional purpose of the experiment was to determine whether different feedback conditions lead to different amounts of learning. No significant Test Phase  $\times$  Group interactions were observed, meaning that we did not find evidence in favor of one or more of the different feedback conditions.

Previous studies with the Müller-Lyer illusion have also reported learning effects. These studies show that performance improves after practice with feedback (e.g., Predebon, 1998, 2004, 2006; Schiano & Jordan, 1990) and by mere observation (e.g., Brosvic et al., 1993; Brosvic & Finizio, 1995; Heath, Rival, & Neely, 2006). However, the methodologies used in these studies are mostly very different than ours.

## 4.3 Experiment 2

How do movements in information spaces unfold? In the General Introduction we described potential-based and direct approaches. Testable hypotheses for the Müller-Lyer task were derived from these approaches. In this task, the mean squared error is a candidate potential function and the mean directional error is a candidate for information for learning. The present experiment contrasts these potential-based and direct hypotheses. The predictions for the practice conditions used in the experiment are illustrated in Figure 4.5. The graph on the left side of the figure, corresponding to Practice Condition 1, shows a potential function with a minimum at the informational variable real length ( $x=.12$ ), and a vector field leading to the informational variable centroid-to-centroid distance ( $x=.88$ ). The opposite occurs for Practice Condition 2, illustrated on the right side of the figure.

Participants were divided into two groups. Group 1 practiced with Practice Condition 1 and Group 2 with Practice Condition 2. If learning is based on our candidate potential function, then participants in Group 1 are predicted to move to the left in the space and participants in Group 2 are predicted to move to the right. If, on the other hand, learning is based on our candidate for information

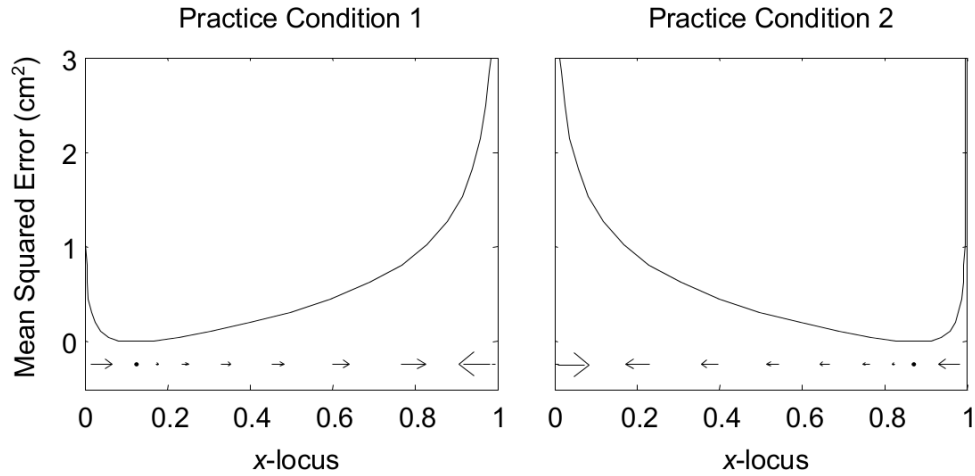


FIGURE 4.5 Predicted mean squared errors and directional errors for Experiment 2. Mean squared errors (continuous curves) and directional errors (vector fields) predicted by the use of the different informational variables ( $x$ -loci), for Practice Condition 1 (left panel) and Practice Condition 2 (right panel) of Experiment 2.

for learning, then participants in Group 1 are predicted to move to the right and participants in Group 2 to the left. We next describe how such practice conditions can be obtained.

First note that one can easily give feedback on centroid-to-centroid distance ( $x=.88$ ) instead of on real length ( $x=.12$ ). This would lead to a potential function with a minimum at  $x=.88$  and a vector field that also leads to  $x=.88$ . Hence, if one gives feedback based on centroid-to-centroid distance, then both the potential-based and direct hypotheses would predict movement in the space toward  $x=.88$ . Movements toward such feedback-defined loci have been shown to occur in tasks other than our length-estimation task (e.g., Arzamarski et al., 2010; Jacobs et al., 2009; Michaels et al., 2008).

The crux of our methodology is that the candidate potential function (based on squared errors) and information for learning (based on directional errors) can be manipulated to a large extent independently. This is because the squared errors and directional errors indicated by the feedback can to a large extent be manipulated independently. A squared error depends on the magnitude of the error but not on the direction of the error. This means that the direction of the error indicated by the feedback can be manipulated without affecting the squared error and hence without affecting the potential function. Likewise, the magnitude of the error indicated by the feedback can be manipulated without altering the sign of the directional error, meaning that the potential function can be chosen

independently of the direction indicated by the vector field.

### 4.3.1 Method

Experiment 2 was similar to Experiment 1 with the following exceptions. Thirty-three students of the Autonomous University of Madrid participated, 16 in Group 1 and 17 in Group 2. Their age ranged from 18 to 27 years with a mean of 20.6 years. None of them participated in Experiment 1. The experiment consisted of 3 blocks of 42 trials. The stimuli were obtained through the factorial combination of 7 shaft lengths (4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, and 7.0 cm) and 6 angles between shaft and arrowhead segments (.2, .3, .4, .6, .7, and .8  $\pi$  radians). The length of arrowhead segments was one fourth of the length of the shaft. The initial length of the gauge was always 5.5 cm. Blocks 1 and 3 were identical for all participants with the exception of the presentation order of the trials, which was randomized for each block of each participant.

Feedback was given only in Block 2. After a judgment was confirmed with the down-arrow key, the red response gauge moved from the screen corner to a position just above or below the double-headed arrow, depending on whether the gauge started from an upper or lower corner on that trial (the gauge never crossed the shaft of the double-headed arrow). The trajectory of the gauge was similar to the one indicated by the dashed diagonal lines in the right panel of Figure 4.4. The translation was performed in 2 s. During the translation, intervals of 10 ms in which the gauge was visible were alternated with intervals of 190 ms in which the gauge was not visible. The two arrowhead segments on the side of the gauge (i.e., either the upper or the lower arrowhead segments) were not visible during the translation of the gauge. These segments reappeared when the gauge reached its final position. The gauge remained visible for .5 s at its final position. The final position of the gauge near the double-headed arrow made estimation errors easily visible to the participants. However, the length of the gauge was manipulated during the translation without participants being informed about this.

In Practice Condition 1, the magnitude of the error indicated by the final position of the gauge was the same as the magnitude of the error committed on that trial as computed with regard to the length of the shaft of the stimulus. The direction of the error indicated by the final position of the gauge was equal to the direction of the error committed on that trial as computed with regard

to the centroid-to-centroid distance. In Practice Condition 2, the magnitude of the error indicated by the feedback was computed with regard to the centroid-to-centroid distance, and the direction of the error indicated by the feedback was computed with regard to real shaft length. Group 1 received Practice Condition 1 and Group 2 received Practice Condition 2. Average errors were not displayed after blocks of trials.

### 4.3.2 Results

#### Absolute error

The results of this experiment are presented in Table 4.2. The proportional absolute errors are given in the upper part of the table. No significant effects were observed with an ANOVA on these errors. The ANOVA used Test Phase (pretest, posttest) as within-subjects factor and Group (1, 2) as between-subjects factor; the corresponding statistics were:  $F(1,31)=.92$ ,  $p=.35$ , for Test Phase,  $F(1,31)=.97$ ,  $p=.33$ , for Group, and  $F(1,31)=.39$ ,  $p=.54$ , for the interaction.

TABLE 4.2  
Mean proportional absolute errors and x-loci for Experiment 2

<i>Group</i>	<i>Pretest</i>	<i>Posttest</i>
Proportional absolute error		
1	.104 (.023)	.106 (.018)
2	.110 (.026)	.118 (.045)
<i>x</i> -Locus		
1	.448 (.070)	.435 (.074)
2	.461 (.065)	.472 (.110)

Note: Values within parentheses are standard deviations

Because part of the feedback was computed with regard to centroid-to-centroid distance instead of real length, we performed a similar ANOVA with the proportional absolute error computed with respect to centroid-to-centroid distance. No significant effects were observed in this ANOVA either:  $F(1,31)=.70$ ,  $p=.41$ , for Test Phase,  $F(1,31)=.01$ ,  $p=.93$ , for Group, and  $F(1,31)=.01$ ,  $p=.94$ , for the interaction.

### Informational variables

The  $x$ -loci for this experiment are presented in the lower part of Table 4.2. We performed an ANOVA on the loci with Test Phase (pretest, posttest) as within-subjects factor and Group (1, 2) as between-subjects factor. No significant effects were observed:  $F(1,31)=.01$ ,  $p=.94$ , for Test Phase,  $F(1,31)=1.1$ ,  $p=.31$ , for Group, and  $F(1,31)=.55$ ,  $p=.46$ , for the interaction. Given that the  $p$ -values are far from being significant we will not interpret possible tendencies in these results.

### 4.3.3 Discussion

This experiment was designed to distinguish the potential-based and direct hypotheses described in the General Introduction. The potential-based hypothesis would have been supported by a decrease in  $x$ -loci for Group 1 and an increase for Group 2, and the direct hypothesis would have been supported by the opposite pattern of results. No significant practice effects were observed, meaning that we did not find evidence for any of the hypotheses. A possible explanation for the absence of practice effects is that learning might be due to a mixture of our potential-based and direct hypotheses. The average prediction—no learning—would then be a to-be-expected outcome. Experiment 3 addresses this explanation.

A second possible explanation is that learning might be due to a direct process based on information for learning that we did not consider, or to a potential-based process based on a potential function that we did not consider. Our results would then imply that the operative potential function or the operative information for learning indicates no learning under the practice conditions of the present experiment. This second explanation is not further considered in the present series of experiments.

Let us also mention the following. Five participants in this experiment asked the experimenter whether the feedback was veridical or mentioned that they did not always believe the feedback. We do not know how many other participants did not believe the feedback without mentioning this to the experimenter. The experimenter always replied that the only possible cause of nonveridicality would be a very unlikely and in any case unintended error in the computer code used to run the experiments.

## 4.4 Experiment 3

In the practice conditions of Experiment 2, potential-based and direct explanations made opposite predictions. No learning was observed. This might indicate that the potential-based and direct explanations are both partly correct. The present experiment further tests this possibility. The practice conditions in this experiment are referred to as potential-only and information-for-learning-only or information-only conditions. The potential-only feedback contained a potential function but no information for learning, and the information-only feedback contained information for learning but no potential. That is, the predictions of one of the hypothesis were neutralized. If both hypotheses are partly correct, then learning is predicted to occur in Experiment 3, because one of the hypotheses always indicates learning in the correct direction while the other does not indicate learning in the opposite direction. In addition, we reasoned that the potential-based learning hypothesis would be supported if more learning occurred after potential-only feedback than after information-only feedback, and vice versa.

The practice conditions were computed as follows. In the potential-only practice the sign of the error indicated by the feedback was opposite to the sign of the actual error in about half of the trials. This renders the information for learning (the directional error) useless while it does not affect the potential function (the mean squared error). In the information-only condition the absolute value of the error indicated by the feedback was manipulated but not the sign of the error. The structure of the feedback hence contained information for learning but no potential function.

In contrast to Experiments 1 and 2, the present experiment used a within-subjects design. This means that each participant performed two blocks with feedback: one with potential-only feedback and one with information-only feedback.

### 4.4.1 Method

Experiment 3 was similar to Experiment 2 with the following exceptions. Forty-seven students of the Autonomous University of Madrid participated, 24 in the potential-first group and 23 in the information-first group. Their age ranged from 19 to 30 years with a mean of 22.0 years. None of them participated in Experiments 1 or 2. The experiment consisted of 5 blocks of 42 trials. The

stimuli were obtained through the factorial combination of 7 shaft lengths (4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, and 7 cm) and 6 angles between the shaft and the arrowhead segments (.25, .35, .45, .55, .65, and .75  $\pi$  radians). The order of presentation was randomized per block, but the same randomized order was used for all individuals. Hence, Blocks 1, 3, and 5 were identical for all participants.

Feedback was given in Blocks 2 and 4. In information-only practice trials the direction of the error indicated by the final length of the gauge was the same as the direction of the error that was actually made on that trial. In these trials the magnitude of the error indicated by the gauge was the same as the magnitude of the error made on the test trial with the same trial number in the test block performed immediately before the considered practice block. Because different trial orders were used in the different blocks, a different stimulus was used on that test trial. In potential-only practice trials the magnitude of the error indicated by the final length of the gauge was the same as the magnitude of the error that was actually made on that trial, and the direction of the error indicated by the gauge was the same as the direction of the error made on the test trial with the same trial number in the preceding test block. Otherwise the presentation of the feedback was as in Experiment 2.

The information-first group received information-only feedback in Block 2 and potential-only feedback in Block 4. The potential-first group received potential-only feedback in Block 2 and information-only feedback in Block 4. Mean absolute errors per block were displayed after each block as in Group 3 of Experiment 1.

## 4.4.2 Results

### Absolute error

The results of this experiment are presented in Table 4.3. An ANOVA was performed on the proportional errors (shown in the upper part of the table) with Block (1, 3, 5) as within-subjects factor and Group (potential first, information first) as between-subjects factor. The Block  $\times$  Group interaction was significant:  $F(2,90)=3.6$ ,  $p=.03$ ,  $\eta_p^2=.08$ . Although the effects were relatively small, the values given in the table seem to indicate that the information-only feedback led to a reduction in the proportional absolute error from Block 1 to Block 3 whereas the potential-only feedback led to an increase from Block 1 to Block 3. No main effects were observed:  $F(2,90)=.11$ ,  $p=.90$ , for Block, and  $F(1,45)=1.6$ ,  $p=.21$ ,

for Group.

TABLE 4.3  
Mean proportional absolute errors and  $x$ -loci for Experiment 3

<i>Group</i>	<i>Block 1</i>	<i>Block 3</i>	<i>Block 5</i>
Proportional absolute error			
Potential first	.107 (.023)	.120 (.046)	.117 (.041)
Information first	.111 (.036)	.101 (.027)	.099 (.032)
$x$ -locus			
Potential first	.500 (.058)	.465 (.073)	.447 (.131)
Information first	.485 (.058)	.476 (.072)	.437 (.111)

Note: Values within parentheses are standard deviations

### Informational variables

The  $x$ -loci are shown in the lower part of Table 4.3. We performed an ANOVA on the loci with Block (1, 3, 5) as within-subjects factor and Group (potential first, information first) as between-subjects factor. The effect of Block was significant,  $F(2,90)=5.7$ ,  $p<.01$ ,  $\eta_p^2=.11$ . The values in the table indicate that the  $x$ -loci decreased with practice, meaning that a leftward movement in our space occurred also in this experiment. The effect of Group and the Block  $\times$  Group interaction were not significant:  $F(1,45)=.06$ ,  $p=.81$ , and  $F(2,90)=.42$ ,  $p=.62$ , respectively.

Note that the potential-first group seemed to show slightly more change in variable use from Block 1 to Block 3 (after potential-only feedback), and the information-first group from Block 3 to Block 5 (also after potential-only feedback). To further test this we computed the change in variable use from Block 1 to Block 3 and from Block 3 to Block 5. We performed a  $2 \times 2$  ANOVA on these changes with Group (potential first, information first) as between-subjects factor and Practice Phase (1 to 3, 3 to 5) as within-subjects factor. No significant effects were observed:  $F(1,45)=.1$ ,  $p=.73$ , for Practice Phase,  $F(1,45)=.03$ ,  $p=.87$ , for Group, and  $F(1,45)=1.5$ ,  $p=.23$ , for the interaction. The absence of a significant interaction means that we cannot conclude that the potential-only feedback led to more change in variable use than the information-only feedback.



### 4.4.3 Discussion

The present experiment shows that movement in a variable space is observed if the structure of the feedback (a) contains a potential function but no information for learning or (b) contains information for learning but no potential function. This finding is consistent with the suggestion that the potential-based and direct hypotheses formulated in the General Introduction are both partly correct and, hence, with the learning effects observed in Experiment 1 and the absence of learning observed in Experiment 2<sup>5</sup>.

Experiments 2 and 3 are related to previous studies concerning knowledge of results (e.g., Schmidt & Lee, 2005, chap. 12). Such studies have shown that quantitative feedback (magnitude and direction) leads to more learning than right-wrong feedback (Trowbridge & Cason, 1932), and that increasing the precision of the feedback leads to larger improvements in performance, until a certain limit (McGuigan, 1959; cf. Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984). Our theoretical framework is relevant to this literature in two regards. First, rather than concentrating on basic properties such as precision, we propose to search for higher-order informational properties of the feedback (cf. Fowler & Turvey, 1978). Second, movement in a state space is an alternative way to measure the change effected by feedback.

In the present experiment eight participants asked the experimenter whether the feedback was veridical or mentioned that they did not always believe the feedback. As in Experiment 2, the experimenter always replied that the only possible cause of nonveridicality would be an unlikely and unintended error in the computer code. Again, we do not know how many other participants did not believe the feedback without mentioning this to the experimenter.

---

<sup>5</sup>In a preliminary experiment reported in a conference abstract (Jacobs, Ibáñez, & Travieso, 2010), we found that potential-only practice similar to the potential-only practice used in the present experiment led to less movement in a variable space than practice with veridical feedback. This led us to conclude that learning this task is at least partly direct. A comparison of the results of Experiments 1 and 3 indicates that veridical feedback might have led to more change in variable use also in the present study. Even so, whereas the change in variable use after potential-only practice reached statistical significance in the current experiment, it did not reach significance in the experiment reported in the conference abstract.

## 4.5 General discussion

In the introduction of this article we described potential-based and direct approaches to learning and we illustrated how testable hypotheses for the Müller-Lyer task can be derived from these approaches. The potential-based hypothesis holds that learning optimizes the mean squared error and the direct hypothesis holds that learning is specific to the mean directional error. Experiment 1 shows that learning occurs in this task if veridical feedback is given, and that this learning can be portrayed as a movement in a variable space. Experiment 2 shows that no learning is observed if the potential-based and direct explanations predict opposite movements in the space. In Experiment 3 movement in the space was observed after practice in which either the potential-based or the direct hypothesis predicted such a movement while the other hypothesis was neutralized (i.e., did not predict any movement). This pattern of results is consistent with the possibility that the considered potential-based and direct hypotheses are both partly correct.

We did not explore other hypotheses that might be derived from the potential-based and direct approaches (i.e., other candidate potential functions and other candidates for information for learning). This means that it is problematic to generalize our results and draw conclusions concerning the approaches themselves. In this sense the distinction between potential-based and direct movements in information spaces shows some similarity to the distinction between direct perception and perception on the basis of heuristics, for which Hecht (1996) claims that “efforts to directly falsify the theories [...] cannot have the desired effect and should be modified and turned into tests of specific hypotheses” (p. 68). The present series of experiments is intended to be an empirical contrast of specific hypotheses. To conclude we consider two more speculative theoretical issues.

### 4.5.1 The time-scales of perception and action and of change in variable use

In our portrayal perception is the detection of informational variables (Gibson, 1979). What is crucial for the detection is the configuration (or setup) of the perceptual system (e.g., Jacobs et al., 2009, Definition 11). An analogy for this use of the concept of configuration is the mechanical composition of the polar planimeter as discussed in Runeson (1977; cf. Michaels & Carello, 1981). Which

informational variable is detected at a particular moment depends on the configuration of the perceptual system at that moment. Being localized at a point of an information space, then, implies a particular configuration of a perceptual system (Jacobs & Michaels, 2007). How easy or difficult is it to change from one position in the space to another? Or, in other words, how easy or difficult is it to become a perceptual system with a different configuration?

The potential-based learning hypothesis holds that the value of a potential function is sampled at different points in the information space. This means that, in order to determine the gradient, multiple configurations of the perceptual system are explored. The perceptual system itself, or a central executive, might thus be supposed to be able to manipulate the configuration as a means to an end. Furthermore, to determine the gradient of the potential function the system must somehow keep record of the sampled configurations (loci) and the associated values of the potential function. The plausibility of the potential-based approach hence depends on the feasibility of the claim that the configuration of the system is able to quickly change itself (or to be changed by a central executive) and to keep record of those changes. To us this reasoning seems to imply that potential-based approaches run the risk of becoming homunculus based.

The direct approach is different in this regard. The configuration of the perceptual system does not need to be changed or manipulated in order to detect information for learning, because information for learning is accessible from a single locus. Neither does the system need to keep record of loci/potential-function pairs. What is hypothesized, instead, is a circular causality of processes with different time scales (cf. Jacobs & Michaels, 2002). The faster process of perceiving or acting in an environment lawfully generates information for learning, which slowly changes the configuration of the system, and hence the way in which information for learning is generated. Maintaining specificity at different levels (i.e., at the level of perception and action and at the level of learning) is all that the functioning of a system is supposed to consist of. The feasibility of the direct approach hence does not depend on the issue of whether the configuration of a perceptual system can be manipulated or controlled on short time-scales.

#### **4.5.2 Modes of apprehension and modes of learning?**

Perception is typically of nonelementaristic properties (Runeson, 1994; Turvey, 1992). As an example, it might be possible to perceive whether a surface is walk-

on-able. Agents might also perceive the slope and texture of the surface and the grip of their shoes and infer the affordance from these perceived properties. More generally, apprehension might occur by perceiving the property of interest or by inferring the property interest from related properties (Runeson, Juslin, & Olsson, 2000). An exhaustive account of human apprehension should include perceiving and inferring. Inferences alone cannot explain how properties are apprehended because of the problem of infinite regress. One can infer a first property from a second, which can be inferred from a third, but, eventually, some property must be perceived. On the other hand, a little introspection seems sufficient evidence that inferential apprehension is possible.

Runeson et al. (2000) proposed that learning entails a mode transition from cognitive/inferential (indirect) to perceptual (direct) apprehension: Novices perceive environmental properties that are not of primary interest and infer the properties of interest from the perceived properties, whereas experts are able to directly perceive the properties of interest (Anderson, 2009; Andersson & Runeson, 2008; Runeson & Andersson, 2007). This means that, with practice, perception captures territory from cognition (cf. Hajnal, Grocki, Jacobs, Zaal, & Michaels, 2006).

One could speculate that modes of apprehension go together with modes of learning. Cognitive and inferential apprehension might mainly go together with indirect learning (e.g., potential-based learning) and perceptual and perceptual-motor functioning with direct learning. If so, then the fact that our findings are consistent with a mixture of potential-based and direct learning may indicate that the apprehension of line-length itself is a mixture of directly perceiving and inferring. However this may be, we think that it would be interesting to contrast potential-based and direct hypotheses using more ecologically relevant tasks that are more perceptual and less inferential than the Müller-Lyer task, or, on the other hand, using tasks that are more inferential. The methodology explored in this study may be a starting point for such a comparison.

---

## Capítulo 5

# Aplicaciones a las Ciencias del Deporte

Según el enfoque neogibsoniano, el aprendizaje perceptivo y perceptivo-motor es un proceso que consiste en mejorar la detección y el uso de la abundante información que existe en el ambiente. Ésta afirmación es el punto de partida de un marco conceptual y metodológico para el análisis del aprendizaje que incluye los conceptos de educación de la atención y calibración y, más recientemente, las nociones de espacio informacional, del aprendizaje por función potencial y del aprendizaje directo. En este artículo se introduce el enfoque neogibsoniano y se describen las implicaciones de dicho enfoque en el diseño de programas de entrenamiento. En particular, se plantea una explicación de por qué la introducción de variabilidad en el entrenamiento facilita la mejora en el rendimiento deportivo, y propuestas concretas de cómo ha de introducirse tal variabilidad para que sea beneficiosa.

## 5.1 Introducción

El término “psicología ecológica” se usa para enfoques que estudian fenómenos psicológicos en la escala del nicho ecológico del organismo, es decir, en la escala de la interacción entre el organismo y su entorno (Araújo y Davids, 2009). La teoría ecológica de la percepción y del control visual del movimiento iniciada por Gibson (1979), y desarrollado posteriormente por investigadores neogibsonianos, se sitúa dentro de este marco. El enfoque ecológico en general, y el enfoque neogibsoniano en particular, son de gran interés para las ciencias del deporte.

En primer lugar, las tareas estudiadas desde el enfoque neogibsoniano tienen un mayor parecido a la actividad deportiva que las tareas características de otros enfoques (como por ejemplo las tareas de tiempo de reacción del enfoque cognitivo). En segundo lugar, el reciente aumento del número de estudios neogibsonianos que tratan temas de aprendizaje perceptivo y perceptivo-motor (e.g., Fajen y Devaney, 2006) encaja a la perfección con el interés que muestran las ciencias del deporte en cuestiones sobre entrenamiento y ejecución de expertos (en tareas deportivas). Por último, se ha demostrado que la introducción de variabilidad en el entrenamiento puede facilitar la mejora en el rendimiento deportivo (e.g., Schöllhorn et al., 2006), y el enfoque neogibsoniano proporciona un marco conceptual para entender por qué la variabilidad produce un efecto beneficioso además de proporcionar pistas sobre el tipo de variabilidad que es, o no, útil.

El objetivo de este artículo es, pues, el de exponer las aportaciones del enfoque neogibsoniano a las ciencias del deporte. De los anteriores trabajos que relacionan el enfoque neogibsoniano y las ciencias del deporte destacamos las revisiones de Fajen, Riley y Turvey (2009), sobre el concepto de *affordance*, y la revisión de Montagne (2005), sobre el concepto de *control prospectivo*. Consideramos nuestro artículo como complementario a estas revisiones: con menos énfasis sobre dichos conceptos y más énfasis sobre el aprendizaje perceptivo y perceptivo-motor. La Sección 5.2 de este artículo introduce conceptos básicos, las Secciones 5.3 y 5.4 describen la teoría neogibsoniana del aprendizaje y sus implicaciones, y la Sección 5.5 relaciona la teoría expuesta a lo largo del artículo con los conceptos de variabilidad y de entrenamiento adaptativo, presentando un ejemplo adicional.

## 5.2 La riqueza informacional como punto de partida

Empecemos con un ejemplo clásico. Imagínense una pelota que se acerca a un observador. El tamaño angular de la pelota en un momento dado, visto por el observador, se suele indicar con la variable  $\theta$ . La tasa de cambio en el tamaño angular, o la derivada temporal de este tamaño, se indica con  $\dot{\theta}$ . La ratio de ambas variables se denomina *tau*:  $\tau = \theta/\dot{\theta}$ . La variable  $\tau$  es interesante porque se ha demostrado que para muchos acercamientos es específica al tiempo restante para el contacto: si el tiempo restante es  $X$  segundos, entonces el valor de  $\tau$  es  $X$  (Lee y Reddish, 1981).

Podemos considerar dos modelos para la percepción del tiempo de contacto. El primero es que el observador detecte información acerca de la velocidad y la distancia instantáneas de la pelota, y luego use estos valores para calcular el tiempo de contacto. El segundo es que el observador detecte la variable informacional  $\tau$ , que le proporciona información acerca del tiempo de contacto sin necesidad de detectar la distancia o la velocidad, y sin necesidad de ejecutar cálculos internos o inferencias. Este segundo modelo es un buen ejemplo de un modelo ecológico.

Este ejemplo nos muestra que, si la base informacional de la percepción es la variable  $\tau$ , entonces no se necesitan los hipotéticos estados internos ni las inferencias implicados por el uso de la distancia y la velocidad. En esta sección introduciremos varias líneas de pensamiento relacionadas con esta idea. Veremos que un axioma básico del enfoque neogibsoniano es que existen variables análogas a  $\tau$  para muchas otras tareas (Sección 5.2.1), que este axioma sólo es posible si se rechaza el elementalismo que forma la base de la psicofísica y del cognitivismo (Sección 5.2.2), y que el axioma requiere de la noción de restricciones en el nicho ecológico (Sección 5.2.3).

### 5.2.1 La percepción directa y el concepto de especificidad

La teoría ecológica de la percepción nació, en parte, como una reacción a las teorías indirectas de la percepción, que propugnan la pobreza y ambigüedad de los estímulos y, por lo tanto, la necesidad de enriquecerlos por medio de inferencias que restituyan su capacidad de formar representaciones fidedignas de la realidad (Fodor y Pylyshyn, 1981). Por su parte, la teoría ecológica de la percepción afirma que el entorno es abundante en información útil, por lo que los

agentes no necesitan mecanismos inferenciales ni estados representacionales para que la percepción sea verídica (Gibson, 1979; Turvey, Shaw, Reed y Mace, 1981).

La percepción se denomina *directa* si consiste en detectar la información ambiental. Es decir, si aparte de la detección de la información no se requieren procesos inferenciales y representacionales. Si, además, la información detectada no es ambigua respecto a la propiedad que se quiere percibir, entonces se produce un ajuste entre percepción y realidad. Esto es lo que hace de la teoría ecológica una teoría realista (Shaw, Turvey y Mace, 1982; cf. Jacobs y Michaels, 2002).

De forma relacionada, decimos que una variable informacional es *específica* a una propiedad del nicho ecológico si la variable está en una relación uno a uno con la propiedad. Por ejemplo, cada valor del tiempo de contacto da lugar a un valor determinado de la variable  $\tau$ . Sabiendo el tiempo de contacto, se sabe el valor de la variable  $\tau$ , y sabiendo el valor de  $\tau$ , se sabe el tiempo de contacto. En general, si una variable es específica a una propiedad del nicho ecológico, entonces esa variable permite la percepción verídica de la propiedad sin necesidad de detectar otras variables informacionales y sin cálculos internos o inferencias.

En caso contrario, se dice que una variable no es específica a la propiedad. Por ejemplo, un cierto valor del tamaño óptico puede indicar un tiempo de contacto largo para objetos grandes y lentos, y puede indicar un tiempo de contacto corto para objetos pequeños y rápidos. Si se detecta un estímulo no específico, entonces se requiere la detección de estímulos adicionales y de inferencias para lograr una percepción verídica de una propiedad; la detección de un estímulo no específico por sí solo no permite una percepción verídica.

En resumen, el realismo de la teoría ecológica se fundamenta en la posible existencia de información ambiental que es específica a propiedades del nicho ecológico relevantes para el organismo. Esta afirmación es propiamente un principio de constitución de la disciplina, o un axioma, pues antes que como un hecho contrastable debe considerarse como una doctrina metodológica que da sentido al programa de investigación ecológico. Una vez aceptada la posibilidad de la especificidad entre información y las propiedades del nicho ecológico, el papel del investigador es identificar variables específicas a propiedades relevantes y determinar si los observadores hacen uso de tales variables. Veamos ahora un primer concepto que facilita la identificación de variables específicas: el concepto de variables de alto orden.



### 5.2.2 Variables de alto orden y sistemas perceptivos inteligentes

En contraposición al elementarismo, la teoría ecológica de la percepción afirma que la información que detectan los sistemas perceptivos no tiene por qué ser aquella que a nosotros nos parece más elemental. Como el proceso perceptivo no implica ni inferencias ni reconstrucciones, para que la percepción pueda regular la amplia variedad de comportamientos y situaciones que un organismo ha de enfrentar es necesario que la información ambiental detectada esté suficientemente elaborada o sea, como se suele denominar, *de alto orden* (Michaels y de Vries, 1998). Dicho de otro modo, la complejidad de los cálculos que el sistema nervioso ha de realizar según teorías indirectas de la percepción es atribuida, ahora, al ambiente o, más concretamente, a la interacción adaptativa entre el organismo y su ambiente (cf. O'Reagan y Noë, 2001). Teniendo en cuenta que los sistemas perceptivos han estado sujetos a largos procesos evolutivos, no es arriesgado afirmar que los patrones ambientales que detectan puedan ser complejos. Así, integran información en intervalos de tiempo amplios, de diferentes zonas de la estimulación visual, o de diferentes modalidades perceptivas (Runeson, 1977).

Ejemplos clásicos de variables de alto orden son los gradientes de textura y el flujo óptico (Gibson, 1979). Los gradientes de textura pueden especificar, por ejemplo, si un terreno es llano u ondulado, y el flujo óptico puede especificar el movimiento de un observador respecto a su ambiente. Obsérvese, en este sentido, el contraste del enfoque ecológico con el enfoque cognitivo y con la psicofísica, que en sus trabajos experimentales suelen hacer uso de estímulos simples tal y como la presentación de luces pequeñas durante intervalos de tiempo reducidos o de sonidos con poca variación tonal (véase Abernethy, Neal y Koning, 1994, para un estudio donde se demuestra la independencia entre habilidades psicofísicas y habilidades deportivas). Este contraste puede generar escepticismo acerca de la capacidad de los sistemas perceptivos para detectar variables de alto orden de manera directa. La siguiente analogía puede dar una intuición sobre esta cuestión.

En un trabajo ya clásico sobre la naturaleza de los sistemas perceptivos, Runeson (1977) presenta el ejemplo del planímetro polar (inventado en 1854 por Jakob Amsler-Laffon), que ilustra la teoría de percepción propuesta por Gibson (1979). El instrumento es sorprendentemente simple. Como se observa en la Figura 5.1, el planímetro detecta información relacionada con el perímetro del área que se quiere medir y, a través de una calibración precisa y oportunista de sus componentes

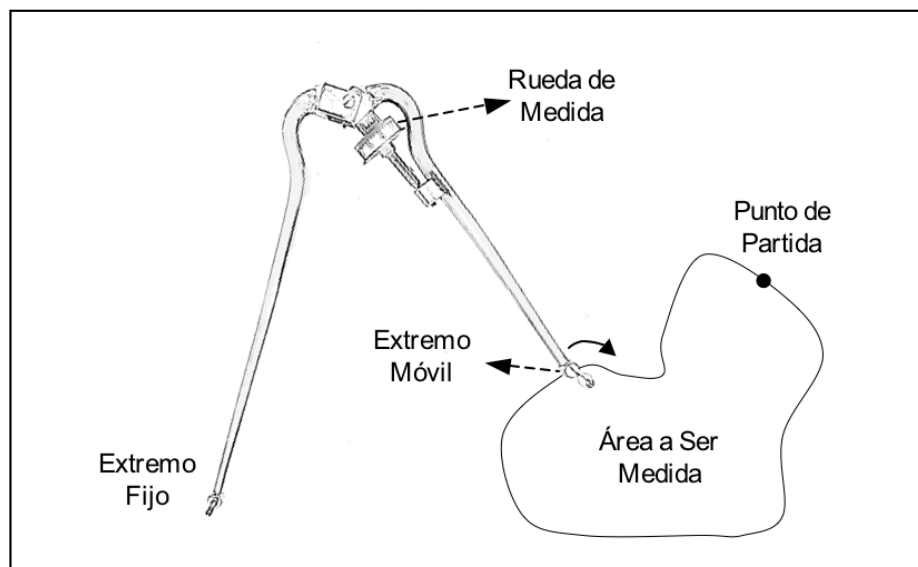


FIGURA 5.1 Representación esquemática de un planímetro polar. El extremo fijo del planímetro se mantiene en un punto determinado mientras se traza el perímetro del área a ser medida con el extremo móvil, en la dirección de las agujas del reloj. Durante el trazado la rueda de medida gira y derrapa según su orientación respecto al movimiento. Si en el punto de partida el indicador de la rueda está en cero, al llegar de nuevo al punto de partida este indica la superficie del área. El planímetro en la figura fue fabricado en el primer cuarto del Siglo XX por la compañía “American Steam Gauge and Valve Mfg. Co.” (Sara Schechner, Comunicación Personal).

mecánicos, mantiene una especificidad entre la superficie del área a ser medida y la superficie indicada por el instrumento. Lo esencial de la analogía es que el planímetro no calcula una variable compleja (el área a medir) a partir de cálculos sobre variables sencillas (como la anchura y altura del área), sino que es capaz de detectar la variable compleja por su propia constitución. De manera análoga, se puede suponer que los sistemas perceptivos de observadores son capaces de detectar variables de alto orden por su propia constitución y sin necesidad de llevar a cabo cálculos o inferencias. Tales sistemas perceptivos se denominan *sistemas perceptivos inteligentes* (“smart perceptual mechanisms”).

La búsqueda de variables informacionales de alto orden ha tenido un eco importante en el estudio de la percepción en general y también en el ámbito del deporte. Entre la larga lista de ejemplos se incluyen estudios sobre la información que podrían usar los porteros para interceptar penaltis (Craig, Berton, Rao, Fernandez y Bootsma, 2006), estudios sobre las llamadas estructuras dinámicas

que se han empleado en el contexto de la anticipación de la dirección de golpes en tenis (Huys, Smeeton, Hodges, Beek y Williams, 2008) y tiros de penalti en fútbol (Ford, Hodges, Huys y Williams, 2006), y estudios sobre la aceleración óptica que se podría usar para interceptar pelotas altas en béisbol (Zaal y Michaels, 2003; cf. Montagne, 2005). En este contexto también se pueden mencionar los muchos resultados experimentales a favor y en contra del uso de la variable  $\tau$  (e.g., Bootsma y Craig, 2002; Jacobs y Díaz, 2010).

Queremos resaltar que la complejidad de las variables informacionales de alto orden puede dificultar las instrucciones explícitas sobre ellas. Usando el ejemplo de  $\tau$ , podemos intuir que no será útil decir a un atleta que debe focalizar su atención sobre la ratio del tamaño óptico con su derivada temporal. Por lo tanto, los métodos que se consideran en éste artículo pretenden organizar las condiciones de entrenamiento para que se facilite el descubrimiento implícito de las variables informacionales. Aun así, con nuestro énfasis en procedimientos implícitos no pretendemos negar que otros tipos de instrucciones explícitas puedan ser indispensables.

### 5.2.3 Especificidad informacional y restricciones

Como comentamos más arriba, la teoría ecológica fundamenta la percepción en la especificidad entre la información ambiental y las propiedades que se perciben. Por tanto, una de las tareas del investigador ecológico es delimitar las condiciones en que se garantiza esa especificidad información-ambiente. Es decir, debemos conocer qué leyes o regularidades garantizan que una determinada variable de alto orden detectable en el ambiente especifique una cierta propiedad ambiental que se quiere percibir. Estas leyes, o regularidades, se denominan *restricciones* (“constraints”), pues restringen las posibilidades o grados de libertad en que puede presentarse el ambiente o la energía en el ambiente (Gibson, 1979; Runeson, 1988).

Veamos un primer ejemplo de este uso del concepto de restricción. Durante el aterrizaje, un piloto verá una expansión óptica que abarca una parte importante del campo de visión y que se centra en el punto al cual el avión se dirige en este momento. El centro de tal expansión especifica la dirección actual del movimiento. Esta especificidad está garantizada por la restricción de que la superficie terrestre no se puede deformar (agrandar) de forma que genere la misma expansión óptica para un observador estático. Si la superficie terrestre se pudiese deformar, entonces el centro del flujo óptico perdería esta especificidad. En este caso, una

expansión óptica podría indicar tanto un acercamiento a la superficie terrestre como una expansión regular de toda la superficie. La nula probabilidad de una expansión regular de la superficie terrestre es una de las restricciones necesarias para que el flujo óptico informe sobre el movimiento de un observador.

Veamos otro ejemplo. La gravedad es aproximadamente similar en todos los puntos de la tierra, lo que garantiza que objetos que caen bajo la influencia de la gravedad caen de la misma forma. De ahí se deriva que el patrón óptico que llega a un observador puede especificar la distancia de un objeto que cae de forma vertical: cuanto más lejos el objeto, más pequeña la aceleración óptica (e.g., Saxberg, 1987). También, en el citado ejemplo de pelotas altas en béisbol, la aceleración óptica especifica si una pelota alta va a caer delante o detrás del observador (Zaal y Michaels, 2003). Nótese que, si la gravedad no fuese constante, entonces estas especificidades no existirían. En otras palabras, la restricción de una gravedad constante garantiza la especificidad de estas variables informacionales.

La psicología ecológica considera restricciones de muchos tipos. Según su grado de generalidad, distinguimos entre restricciones universales, cuando se basan en leyes matemáticas, físicas, químicas o biológicas que son válidas para cualquier organismo y situación (como la ley de la gravedad o las leyes de la óptica), ecológicas, cuando son válidas para todos los miembros de una especie (como los modos de locomoción que puede llevar a cabo un organismo), y locales, cuando son válidas sólo para una tarea o situación determinada (como por ejemplo las manipulaciones de un experimento, o las reglas de un juego). Una crítica del enfoque ecológico a otros enfoques es precisamente que no tienen suficientemente en cuenta el papel de las restricciones, lo que implica que desestiman el valor informativo de las variables en el ambiente. En general, la especificidad información-ambiente, y por tanto la percepción directa y verídica, sólo se puede dar gracias a las restricciones.

Lo anterior no implica que todas las propiedades del nicho ecológico estén especificadas por variables informacionales detectables, y tampoco que los observadores puedan detectar todas las variables específicas que se encuentran en su entorno (cf. Travieso y Jacobs, 2009). Al contrario, detectar variables específicas podría implicar un proceso de aprendizaje. En las siguientes secciones consideramos tal proceso de aprendizaje.

## 5.3 El aprendizaje perceptivo y perceptivo-motor

La percepción o, más apropiadamente, el bucle de percepción-acción, puede ser modificado de tres modos. En la Sección 5.3.1 revisaremos estos tres modos. En la Sección 5.3.2 indicaremos unas primeras implicaciones para el diseño de programas de entrenamiento.

### 5.3.1 La educación de la intención, la educación de la atención, y la calibración

En primer lugar, el bucle percepción-acción se puede alterar por medio de un cambio de la intención que consiste en, dada una situación, modificar las metas de la acción. En ciertas situaciones del tenis, por ejemplo, un jugador tendrá que decidir si intenta jugar un golpe de derecha o un revés, o si intenta jugar un “passing shot” o un globo (o dejar de jugar al tenis e intentar otra cosa). Con el tiempo, los jugadores mejoran en la selección de la acción que intentan realizar. Se denomina a este tipo de aprendizaje como la *educación de la intención* (Jacobs y Michaels, 2002, 2007). Sin embargo, debido a la complejidad de la dinámica intencional, los estudios neogibsonianos tienden a asumir una intención determinada (Beek, 2009, formuló una crítica relacionada a ésta temática en reacción a Fajen et al., 2009; aunque véanse también Araújo, Davids y Hristovski, 2006, y Araújo, Davids, Chow, Passos y Raab, 2009).

En segundo lugar, dada una intención, el bucle percepción-acción se puede alterar por medio de la *educación de la atención*, consistente en modificar la variable informacional que es utilizada para dirigir la percepción o acción (e.g., Fajen y Devaney, 2006; Michaels y de Vries, 1998; Withagen y van Wermeskerken, 2009). La mayoría de estos estudios usan diseños con un pretest, un entrenamiento con feedback, y un posttest. Para determinar en qué variables informacionales basan los observadores sus estimaciones (o sus acciones) se pueden usar técnicas de regresión y de correlación. Se calcula, por ejemplo, la correlación entre el juicio perceptivo de un observador y las diferentes variables informacionales, y de ahí se concluye que el observador usa la variable informacional que demuestra la más alta correlación con su percepción-acción. En muchos casos, el rendimiento de los observadores mejora debido al uso de variables no específicas en el pretest, un cambio en el uso de variables durante el entrenamiento, y el uso de variables

específicas en el posttest.<sup>1</sup>

Estos trabajos están relacionados con estudios en el ámbito del deporte que buscan determinar dónde se dirige la mirada para estimar qué información está siendo empleada. En tenis, por ejemplo, se ha demostrado que los jugadores novatos dirigen la mirada más a zonas distales (e.g., la raqueta del oponente) que los expertos, que dirigen la mirada más a zonas más proximales (e.g., el cuerpo del oponente; Ward, Williams y Bennett, 2002). Estos resultados apuntan a un cambio en las variables informacionales utilizadas y, por tanto, son consistentes con los resultados mencionados anteriormente (obtenidos con técnicas de regresión y correlación). Otros estudios en el ámbito del deporte relacionados con la temática de la educación de la atención incluyen las variables informacionales detectadas por expertos y novatos en cricket (Müller y Abernethy, 2006) o en porteros de hockey hierba (Cañal-Bruland et al., 2010).

Un tercer cambio en el bucle percepción-acción se denomina *calibración* (e.g., Jacobs y Michaels, 2006). Consideremos como ejemplo la intercepción de pelotas que pasan lateralmente a poca distancia del observador. Supongamos que la aceleración lateral de la mano es función de una determinada variable informacional, tanto para un principiante como para un experto. Aun así, un determinado valor de la variable informacional que es utilizada podría dar lugar a una aceleración menos (o más) pronunciada para el principiante que para el experto. La calibración, entonces, consiste en modificaciones en la función de ajuste de la ejecución a los valores de la variable informacional utilizada para dirigir dicha acción. Jacobs y Michaels demostraron que una parte de la mejora en el rendimiento de observadores que interceptan pelotas lanzadas hacia ellos es debida a la calibración.

A lo largo de este artículo nos centraremos en la educación de la atención, aunque muchos de los conceptos que expondremos también son de aplicación en el estudio de los mecanismos de calibración. Seguiremos la exposición de conceptos teóricos en la Sección 5.4, pero antes consideramos implicaciones que se derivan de la teoría descrita hasta ahora.

---

<sup>1</sup> Referimos el lector a Jacobs y Michaels (2002) para una discusión sobre la relación entre la educación de la atención y el realismo ecológico.

### 5.3.2 Implicaciones en los métodos de entrenamiento: primera ronda

La teoría neogibsoniana, y en particular la teoría de la educación de la atención, atribuye mejoras en el rendimiento a cambios en la base informacional de la percepción y la acción. Esta teoría difiere notablemente de teorías que atribuyen la mejora en el rendimiento a cambios en el procesamiento interno o a la adquisición de representaciones internas más elaboradas, lo cual tiene importantes implicaciones. Desde la perspectiva ecológica la pregunta no es, por ejemplo, cómo se puede lograr que un atleta tenga representaciones más adecuadas. Al contrario, se intenta facilitar el cambio en el uso de variables informacionales hacia variables de más utilidad. Veamos como ejemplo un estudio de estimación de magnitudes (Jacobs, Runeson y Michaels, 2001; cf. Beek, Jacobs, Daffertshofer y Huys, 2003).

Jacobs et al. (2001) analizaron estimaciones de la masa de bolas que colisionaban a la vista del participante. Las bolas se acercaban con diferentes velocidades y tenían diferentes masas, generando variaciones en las propiedades cinemáticas accesibles al participante (es decir, en las variables informacionales accesibles al participante). Se usaba un diseño pretest-entrenamiento con feedback-posttest. En la fase de entrenamiento de un primer experimento, un grupo de participantes veía una selección de colisiones con correlaciones perfectas ( $r=1$ ) entre las variables cinemáticas visibles y la masa real, que era la propiedad a estimar, mientras otro grupo veía colisiones en que las propiedades cinemáticas más usadas inicialmente correlacionaban de forma moderada con la masa ( $r=.37$  y  $r=.79$  para sendas variables). Los participantes en la condición de correlación moderada realizaron cambios hacia las variables cinemáticas más útiles y de más alto orden, tal y como se había visto en experimentos anteriores, mientras que los participantes en la condición de correlaciones perfectas no realizaron cambios en el uso de variables. En otras palabras, este experimento indica que si las condiciones de entrenamiento son tales que las variables informacionales usadas inicialmente son más útiles de lo normal, entonces las condiciones de entrenamiento logran menos cambios en la ejecución de la tarea.

En el segundo y tercer experimento de este trabajo se planteó la pregunta opuesta: ¿Se producen más cambios en la ejecución de una tarea si las variables informacionales que se usan al inicio son menos útiles durante el entrenamiento? Se consideraron varias maneras de reducir la utilidad de las variables informacionales. Primero, seleccionando colisiones para las cuales las variables infor-

macionales tenían poca variabilidad. Segundo, seleccionando colisiones para las que distintas variables -con una variabilidad normal- tenían una correlación nula ( $r=0$ ) con la propiedad a estimar. Y tercero, seleccionando colisiones para las que una variable tenía una correlación nula ( $r=0$ ) con la propiedad a percibir, mientras las otras variables tenían correlaciones moderadas o altas con la propiedad a percibir. Los primeros dos tipos de entrenamiento no eran muy exitosos, pero el tercer tipo de entrenamiento resultó eficaz al promover cambios hacia variables más útiles siempre que la variable de correlación reducida fuese la variable usada inicialmente por el participante.

En resumen, la rapidez con que se produce la educación de la atención depende de las condiciones de entrenamiento. Los factores del entrenamiento que han de considerarse en este proceso son la variabilidad de las variables informacionales y, sobre todo, su relación (o correlación) con la propiedad a percibir. Imaginemos que el objetivo de un entrenamiento es que los atletas transiten del uso de una variable A (no específica y de bajo orden) a una variable B (específica y de alto orden). Los resultados que se han obtenido hasta ahora aconsejan que en tal situación se deben buscar condiciones de práctica en las que (a) ambas variables tengan una variabilidad normal, (b) la variable A tenga una correlación moderada o baja con la propiedad a percibir, y (c) la variable B tenga una correlación alta con la propiedad a percibir.

Usando una tarea de frenado de emergencia, Fajen y Devaney (2006) han mostrado resultados similares a los de Jacobs et al. (2001). Sin embargo, no tenemos constancia del uso de este tipo de metodología en el ámbito del deporte. Un paso crucial para poder aplicar esta metodología en el ámbito del deporte es poseer la capacidad de manipular la variabilidad de las variables informacionales y su correlación con la propiedad a percibir. Veamos, de manera especulativa, cómo se puede lograr esto. Como ejemplo usamos la percepción por parte de los porteros en fútbol de la dirección en la que un oponente va a tirar un penalti, una tarea que tradicionalmente ha interesado en las ciencias del deporte (véase Lopes, Araújo, Peres, Davids y Barreiros, 2008, para una revisión).

Imaginemos que, para anticipar la dirección de tiro de un penalti, cierto portero principiante suele usar la orientación del pie de apoyo del adversario y que su entrenador quiere administrarle un entrenamiento para que deje de usar esta variable. El entrenador usa un entrenamiento con feedback en el cual el portero observa imágenes de vídeo grabados desde el punto de vista del portero.



Cabe esperar que en la base de imágenes del experimentador haya tanto penaltis para los que la orientación del pie de apoyo es muy útil, como penaltis para los que la orientación del pie del apoyo no lo es. El entrenador podrá aumentar la utilidad de la variable “orientación de pie de apoyo” utilizando mayor proporción de las grabaciones en las que esta variable es útil. Recíprocamente, el entrenador podrá reducir la utilidad de esta variable empleando en el entrenamiento mayor proporción de las grabaciones en las que la variable no es útil. De la misma manera, el entrenador puede seleccionar conjuntos de grabaciones en las que la variable “orientación del pie de apoyo” tiene una cierta variabilidad. Manipulando la variabilidad de las variables informacionales, y su correlación con la propiedad a percibir (la dirección del tiro), el entrenador puede replicar la metodología que ha resultado eficaz en las tareas estudiadas por Jacobs et al. (2001) y Fajen y Devaney (2006).

Para aquellos entrenadores que quieran aplicar esta metodología, pero rehúsen el uso de métodos de vídeo-entrenamiento, cabe mencionar lo siguiente. Es probable que diferentes lanzadores de penaltis demuestren una variabilidad natural en la utilidad y la variabilidad de diferentes variables informacionales. Por ejemplo, para algunos lanzadores la orientación del pie de apoyo podría ser un mejor predictor de la dirección del tiro que para otros lanzadores. Entonces, el entrenador puede hacer practicar al portero con lanzadores para los que la variable no es un buen predictor de la dirección del tiro. Obsérvese que, a pesar de que hemos ilustrado la metodología con el ejemplo especulativo de los penaltis, ésta se puede aplicar de una manera muy similar en otras tareas deportivas. Continuamos ahora con conceptos teóricos sobre la educación de la atención.

## 5.4 Un análisis continuo de la educación de la atención

En los ejemplos de la Sección 5.3.2 se consideró un número limitado de posibles variables informacionales. Si uno restringe el estudio a un número limitado de variables, los cambios que se pueden observar en qué variables se usan se limitan a cambios discretos, o saltos, del uso de una de las variables al uso de otra de las variables<sup>2</sup>. Sin embargo, diversos resultados experimentales apoyan de forma cada

---

<sup>2</sup>Obsérvese que esta afirmación no es cierta si uno acepta procesos internos como la combinación de claves, por ejemplo de manera Bayesiana. Referimos el lector a Michaels y Isen-

vez más concluyente que los cambios en el uso de variables a menudo son cambios continuos. En la Sección 5.4.1 se introduce un concepto que permite el estudio de cambios continuos, en la Sección 5.4.2 se describen mecanismos subyacentes al aprendizaje, y en la Sección 5.4.3 se presenta una segunda ronda de implicaciones.

### 5.4.1 Espacios informacionales

Cuantas más variables informacionales considera un investigador, más cambios en el uso de variables puede observar. Por ejemplo, si se consideran dos variables, solo se pueden observar cambios del uso de la primera variable al uso de la segunda variable, y viceversa. Sin embargo, los sistemas perceptivos podrían ser sensibles a más variables informativas que las que son consideradas por el investigador. Esta observación gana en importancia con el rechazo del elementalismo descrito en la Sección 5.2.2, ya que el número de posibles variables aumenta de manera importante con la inclusión en el análisis de las variables de alto orden. Entonces, ¿cuántas variables informacionales tiene que considerar un investigador?

Según estudios recientes, son muchas y, además, estos estudios proponen un formalismo que permite considerar muchas variables (e.g., Jacobs y Michaels, 2007). Así, definen el denominado *espacio informacional* como un espacio continuo en el que situar ordenadamente las variables informacionales potencialmente utilizables por los participantes en una tarea. Cada punto en dicho espacio representa una variable informacional, mientras que las trayectorias en el espacio representan el cambio en el bucle percepción-acción producido por la educación de la atención.

Para situar a un participante en un punto de un espacio informacional, es decir, para atribuirle el uso de una variable determinada, el método general consiste en comparar las estimaciones de la propiedad a percibir hechas por cada variable en cada condición experimental, con las acciones o estimaciones del participante en las respectivas condiciones. Aquella variable cuyas predicciones sean más parecidas a las acciones o estimaciones del participante será considerada la variable empleada durante el bloque de ensayos. Representando las distintas variables empleadas por el participante a lo largo de las distintas sesiones de aprendizaje, podemos ver la evolución del bucle percepción-acción sobre el espacio informacional como consecuencia del aprendizaje.

---

hower (2011) para un contraste entre el enfoque presentado en este trabajo y enfoques como el Bayesiano.

Para integrar estos conceptos nos detendremos en el ejemplo de la detección de la masa de palos sujetos o blandidos desde un punto (Jacobs, Silva y Calvo, 2009), como la estimación del peso de un bate de béisbol (Turvey, 1996). La investigación en el llamado tacto dinámico, o capacidad para estimar propiedades de objetos sujetos con la mano como su masa, longitud o forma, sin visión, ha demostrado que somos sensibles a propiedades relacionales de los objetos como son su masa ( $M$ ), su momento estático ( $ME$ ), y su primer momento principal de inercia ( $I_1$ ). El momento estático es la fuerza que se genera al suspender el objeto horizontalmente desde un punto extremo, y el primer momento de inercia es la resistencia que genera el objeto al intentar rotarlo.

Para muchos objetos estas propiedades se pueden aproximar con las siguientes ecuaciones:

$$M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (5.1)$$

$$ME = \sum_{i=1}^N m_i \cdot d_i \quad (5.2)$$

$$I_1 = \sum_{i=1}^N m_i \cdot d_i^2 \quad (5.3)$$

Para obtener estas aproximaciones se ha dividido el objeto blandido, de manera imaginaria, en  $N$  trozos pequeños. La masa del trozo  $i$  se indica con  $m_i$  y la distancia del trozo  $i$  a un eje de rotación se indica con  $d_i$ . La Ecuación 5.1 indica que la masa del objeto iguala la suma de las masas de los trozos, la Ecuación 5.2 indica que el momento estático iguala la suma de las masas de los trozos multiplicadas por su distancia al eje de rotación, y la Ecuación 5.3 indica que el primer momento de inercia iguala la suma de las masas multiplicadas por las distancias al cuadrado.

La hipótesis básica de los estudios sobre el tacto dinámico es que los movimientos de exploración, al trasladar o rotar el objeto sujeto en la mano, permiten la detección de estas propiedades mecánicas (Travieso, 2002). Por lo tanto, en analogía a las secciones anteriores, se suele referir a  $M$ ,  $ME$  e  $I_1$  como variables informacionales. Para nuestro objetivo es indiferente que estas variables son, en realidad, propiedades mecánicas de los objetos; la lógica de los espacios informacionales se aplica de la misma manera.

Estas mismas variables pueden contenerse en la expresión general:

$$I(x) = \sum_{i=1}^N m_i \cdot d_i^x \quad (5.4)$$

siendo la única variación entre una variable y otra la potencia,  $x$ , a la que se eleva la distancia al eje de rotación,  $d_i$ . Para la masa, que no contempla esa distancia,  $d_i$  se eleva a 0, para el momento estático a 1, y para el momento principal de inercia a 2. Obsérvese que la Ecuación 5.4 define un espacio unidimensional coordinado por el parámetro  $x$  (que puede tomar valores enteros o no enteros). En dicho espacio, cada punto, o cada valor del exponente  $x$ , representa una variable informacional obtenida por medio de la ecuación. La masa está localizada en el punto  $x=0$ , el momento estático en  $x=1$ , y el momento principal de inercia en  $x=2$ . Otros puntos representan otras variables informacionales.

Como primer método de análisis, se puede estudiar la ejecución de una tarea usando únicamente las variables definidas por las Ecuaciones 5.1 a 5.3. Esto implicaría calcular cuál de estas tres variables es el mejor predictor de las estimaciones de los participantes y concluir de ahí que el participante usa ese mejor predictor. La literatura clásica sobre el tacto dinámico considera un número limitado de variables discretas tal y como las definidas en las Ecuaciones 5.1 a 5.3. Sin embargo, este tipo de análisis implica que el aprendizaje consiste en un cambio abrupto o discreto del uso de una variable al uso de otra, y ése no es necesariamente el caso.

Un segundo método de análisis usaría la Ecuación 5.4 en lugar de las Ecuaciones 5.1 a 5.3. Esto implicaría calcular para qué valor de  $x$  la variable  $I(x)$  definida en la ecuación es el mejor predictor de las estimaciones, y concluir que el participante usa esa variable. El trabajo de Jacobs et al. (2009) demuestra que las variables típicamente usadas por los participantes difieren de las variables definidas en las Ecuaciones 5.1 a 5.3, es decir, no se encontró que las variables definidas por la Ecuación 5.4 con  $x=0$ ,  $x=1$ , o  $x=2$  eran mejores predictores de las estimaciones que las variables definidas con otros valores de  $x$ . Esto indica que un análisis con un espacio informacional es preferible a un análisis con un número limitado de variables discretas. Además, un análisis con un espacio informacional permite describir la educación de la atención como un proceso continuo o, dicho con más precisión, como un movimiento continuo a través del espacio.

No hay una manera única de definir un espacio informacional; el investigador

tendrá que adoptar la manera que más convenga para la tarea que se está considerando. Las condiciones que un espacio informacional ha de cumplir son que sea continuo y que cada punto represente una variable informacional detectable en la tarea. Además, a posteriori podemos conocer la conveniencia de un determinado espacio informacional al estudiar las trayectorias de los observadores en ese espacio. Si no se constata ningún movimiento significativo a lo largo de una sesión de aprendizaje, o bien el espacio definido no es apropiado, o bien no existe educación de la atención en las condiciones estudiadas. Si por el contrario existe una traslación significativa en el espacio informacional, dicho espacio captura propiedades relevantes del proceso de aprendizaje estudiado.

Otros ejemplos de espacios informacionales se pueden encontrar en Jacobs y Michaels (2007) y en Michaels, Arzamarski, Isenhowe y Jacobs (2008). Jacobs y Michaels reanalizaron dos tareas de percepción visual que anteriormente se habían analizado con un número limitado de variables informacionales, y demostraron que el aprendizaje en esas tareas se puede caracterizar como un proceso continuo si se analiza con la noción de espacio informacional. Una de estas tareas era la percepción de la masa de bolas considerada en la Sección 5.3.2.

### 5.4.2 Mecanismos de aprendizaje

El análisis de la educación de la atención con un espacio informacional permite profundizar en los mecanismos de aprendizaje. Esto es así, entre otras razones, porque nos acerca al uso de las herramientas de la teoría de los sistemas dinámicos que se desarrollaron para el estudio de movimientos en espacios continuos. En esta sección describiremos un primer ejemplo de ello.

**Funciones de utilidad.** Sobre la base de los trabajos descritos en la sección anterior suponemos que, al estudiar cierta tarea, podemos encontrar un espacio informacional que describe una parte relevante del proceso de aprendizaje. Dicho espacio contempla variables informacionales con distinta utilidad en la tarea, siendo que la utilidad nos proporciona una primera manera para profundizar en las causas del aprendizaje. Para verlo en más detalle retornamos al ejemplo del tacto dinámico.

Recuerden el espacio informacional definido por la Ecuación 5.4. Cada punto en el espacio, o cada valor de  $x$ , define una variable informacional. Imagínense un bloque de 30 ensayos experimentales que consiste de 30 objetos de los que el participante estima una propiedad como la longitud o la masa. Se pueden calcular

los 30 valores de la variable informacional asociada a un punto en el espacio informacional, un valor para cada objeto. En la sección anterior mencionamos que, para determinar la posición del participante en el espacio, estos 30 valores se relacionan con los 30 estimaciones del participante, concluyendo que el participante usa la variable informacional que mejor predice sus estimaciones.

Para determinar la utilidad de una variable informacional, o de un valor de  $x$ , los 30 valores de la variable informacional asociada a  $x$  no se relacionan con las estimaciones del participante, sino con la propiedad a ser percibida. Calculando una utilidad para cada  $x$  en el espacio se obtiene una función escalar definida en todo el espacio informacional. A tales funciones se les denomina *funciones de utilidad*. Como ejemplo podemos definir la utilidad como el cuadrado de la correlación entre la variable informacional y la propiedad a ser percibida. Definida así, y suponiendo una relación lineal, la utilidad de una variable específica es 1, pues su correlación es perfecta, mientras una utilidad de 0 es propia de variables con correlación nula con la propiedad a percibir.

La curva de la Figura 5.2 representa gráficamente una función de utilidad. El eje horizontal de la figura es el espacio informacional descrito en la Ecuación 5.4; cada punto del espacio, o cada  $x$ , corresponde a la variable indicada por la ecuación. La altura de la curva es el cuadrado de la correlación entre las variables en el espacio y la propiedad a percibir, que para este ejemplo se ha definido como una propiedad especificada por la variable momento estático  $ME$ ;  $x=1$ ). Obsérvese que la masa del objeto ( $x=0$ ) y el primer momento de inercia ( $x=2$ ) tienen una correlación cuadrada de  $r^2=.32$  y de  $r^2=.85$  con la propiedad a percibir. Por ello, los observadores que usen estas variables no podrán superar estas correlaciones; es decir, no podrán lograr una correlación al cuadrado más alta entre sus estimaciones y la propiedad a percibir.

**Aprendizaje por función potencial.** Un hipotético proceso de aprendizaje puede tener lugar de la siguiente manera. Un participante localizado en un punto del espacio podrá detectar la utilidad de este punto y de algunos puntos cercanos. Con estas utilidades podrá determinar en qué dirección del espacio él o ella tendrá que moverse para mejorar su rendimiento. Después de moverse cierta distancia en la dirección que se ha determinado, podrá reiniciar el proceso desde el nuevo punto de partida. De esta manera, el proceso de aprendizaje puede acercarse poco a poco al uso de la variable informacional que tiene la mayor utilidad.

El concepto de función de utilidad está estrechamente relacionado con el con-

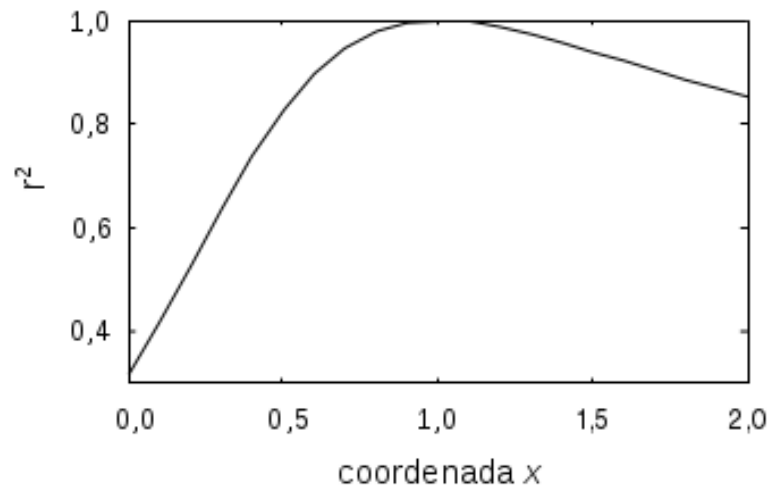


FIGURA 5.2 Función de utilidad para el ejemplo de tacto dinámico. La función está basada en las condiciones de entrenamiento del grupo llamado “fast group” del Experimento 2 de Jacobs et al. (2009).

cepto de *función potencial* que se maneja en la teoría de los sistemas dinámicos. Una diferencia menor entre la función de utilidad mostrada en la Figura 5.2 y el concepto de función potencial es que los procesos de búsqueda suelen converger hacia un mínimo de la función potencial, mientras nuestros participantes convergen hacia el máximo de la función de utilidad. Esta diferencia se puede salvar definiendo la función de utilidad, por ejemplo, como  $1 - r^2$ . Para resaltar la estrecha relación con la teoría de sistemas dinámicos denominamos el proceso de aprendizaje descrito en el párrafo anterior como *aprendizaje por función potencial*.

**Aprendizaje directo.** Según la teoría del aprendizaje por función potencial, la función potencial (o de utilidad) juega un papel causal en los movimientos a través de los espacios informacionales. Éste no es el caso según una teoría alternativa: la teoría del *aprendizaje directo* (Jacobs y Michaels, 2007). La idea básica de esa teoría es que los cambios que se dan en el aprendizaje están especificados en los patrones de la energía en el ambiente, de modo análogo a como está especificada en ella la percepción según la teoría de la percepción directa. La información que especifica los cambios del bucle percepción-acción, denominada *información para el aprendizaje*, se encuentra en las consecuencias perceptibles de las acciones. Es decir, los movimientos a través de los espacios informacionales no se guían por funciones potenciales, sino por la información para el aprendizaje. Una exposición

más detallada de la teoría del aprendizaje directo se puede encontrar en Jacobs et al. (2009), y una comparación del aprendizaje directo y el aprendizaje por función potencial en Jacobs, Ibáñez-Gijón, Díaz y Travieso (2011). La siguiente sección se basa en la teoría de aprendizaje por función potencial. Sin embargo, se pueden formular implicaciones similares a base de la teoría del aprendizaje directo (véanse los trabajos citados en dicha sección).

### 5.4.3 Implicaciones en los métodos de entrenamiento: segunda ronda

En esta sección supondremos que en el estudio de una tarea dada se ha identificado un espacio informacional adecuado, se ha demostrado que el aprendizaje se puede describir con trayectorias aproximadamente continuas en ese espacio, y se ha identificado la función de utilidad que rige el aprendizaje. En este caso, según la teoría de aprendizaje por función potencial, las condiciones de entrenamiento que dan lugar a una función de utilidad más inclinada resultan en un aprendizaje más rápido que aquellas condiciones con una función de utilidad menos inclinada. Es decir, optimizar las condiciones de entrenamiento equivale a optimizar la función de utilidad.

Manipular la inclinación de una función de utilidad no es necesariamente complicado. En la Sección 5.3.2 vimos, a través de los ejemplos de las bolas que colisionaban y de los penaltis, que seleccionando conjuntos de ensayos a usar en un entrenamiento se puede manipular la utilidad de un número limitado de variables informacionales. El mismo tipo de manipulación afecta a la inclinación de las funciones de utilidad. Por ejemplo, en el caso del tacto dinámico, si seleccionamos objetos que reducen (o aumentan) al máximo la utilidad del momento principal de inercia y de la masa, sin alterar la utilidad del momento estático, entonces aumentaremos (o reduciremos) la inclinación de la función de utilidad respecto a la función que se observa en la Figura 5.2.

Consideremos un estudio sobre el aterrizaje en un simulador de vuelo (Huet et al., 2011). Las variables informacionales que se pueden usar en esa tarea incluyen la forma óptica de la pista y el llamado ángulo  $H$  relativo. Huet et al. definieron (1) un espacio informacional que incluye estos dos candidatos y (2) una función de utilidad sobre ese espacio. En su Experimento 2 había dos condiciones de entrenamiento. Para una de las condiciones la función de utilidad era más alta



encima del punto del espacio que representa la forma óptica de la pista y en la otra condición encima del punto que representa el ángulo  $H$  relativo. Los participantes se movieron hacia la variable que era de mayor utilidad en las condiciones de su entrenamiento. Estos resultados indican que manipulando una función de utilidad se puede manipular el proceso de aprendizaje.

Un segundo ejemplo es el Experimento 2 de Jacobs et al. (2009), sobre el tacto dinámico. Este experimento incluía dos grupos experimentales, uno de los cuales practicaba con una función de utilidad más inclinada. Ese grupo mostraba más movimiento a través del espacio informacional que el grupo de comparación, lo que es consistente con las predicciones de la teoría del aprendizaje por función potencial. No tenemos constancia de estudios en el ámbito del deporte que usen este tipo de análisis y este tipo de metodología. Sin embargo, los estudios sobre la variabilidad en las condiciones de entrenamiento se pueden interpretar usando los conceptos introducidos en la presente sección. Estos estudios y su relación con el presente trabajo se considerarán en la Sección 5.5.2

## 5.5 Fuera de juego, variabilidad y métodos adaptativos

Esta última sección del artículo considera una temática más variada que las otras secciones. En primer lugar, indicaremos con un ejemplo adicional que el uso de variables no específicas es una fuente de error en tareas con importancia para el deporte, lo que refuerza las evidencias de que la metodología aquí presentada puede traer avances para las ciencias del deporte. En segundo lugar, relacionaremos la teoría descrita en el presente trabajo con los trabajos acerca de la variabilidad en las condiciones de entrenamiento. En tercer lugar, haremos una mención sobre las aportaciones del presente trabajo al diseño de métodos de entrenamiento adaptativos.

### 5.5.1 El uso de variables no específicas y estimaciones de fuera de juego

Como apuntamos anteriormente, la teoría de la educación de la atención considera que el ajuste a variables informacionales que especifican propiedades del medio en unas determinadas condiciones de entrenamiento es un fenómeno que se da

a partir de la práctica. La riqueza del entorno hace que estén a disposición de los observadores un conjunto amplio de posibles variables informacionales, que no necesariamente especifican la propiedad relevante que se necesita para una ejecución ajustada. Evidentemente, cuanto más frecuente sea el uso de variables no específicas en tareas deportivas, y cuanto más importante sean los errores debidos al uso de tales variables, más relevantes serán los intentos de facilitar la educación de la atención. La hipótesis del uso de variables no específicas ha sido comprobada en diversos trabajos que permiten su generalización a ámbitos del entrenamiento.

Un ejemplo es el trabajo de Oudejans et al. (2000; cf. Beek et al., 2003; Gómez y Botella, 2005). Este trabajo demostró cómo las estimaciones de fuera de juego realizadas por expertos jueces de línea en fútbol están sometidas a errores sistemáticos que no vienen dados por la rapidez en el cambio de la mirada desde el pasador al receptor, como habitualmente son concebidos estos errores, sino por el hecho de que los jueces de línea suelen situarse más cerca de la línea de la portería que el último defensor. Este último hecho causa que la posición retinal de los atacantes respecto a los defensores, variable que según Oudejans et al. es usada por los jueces de línea, no es específica al fuera de juego. Si se usa la posición retinal de los jugadores, entonces los atacantes situados lateralmente en el lado contrario al juez de línea pueden ser vistos en fuera de juego erróneamente, mientras que los atacantes situados lateralmente más cerca del juez de línea que el defensor pueden ser percibidos erróneamente como en posición legal en el momento del centro. Oudejans et al. demostraron que este tipo de fallos son comunes, lo cual es consistente con la hipótesis de que los jueces de línea basan sus estimaciones en la posición relativa en la retina de los jugadores.

En resumen, Oudejans et al. (2000) mostraron que ciertas ejecuciones se basan en la utilización de una variable informacional que no especifica la ejecución óptima. Esto no significa que sea inútil en su uso, sino que mantiene una correlación intermedia o, si se quiere, una ejecución media de la tarea. Oudejans et al. observaron 40 errores de las 200 situaciones de fuera de juego que estudiaron.

El uso de la posición retiniana dará lugar a más errores cuanto más distancia lateral haya entre atacantes y defensores. Usando esta observación, u otras técnicas para manipular la utilidad de las variables, se podría entrenar a los jueces de línea en situaciones en las cuales el uso de la posición relativa de los jugadores en la retina da lugar a más o menos errores. La metodología descrita en el pre-

sente artículo predice que este tipo de manipulaciones tendrán un efecto sobre el rendimiento de los jueces después del entrenamiento. En la siguiente sección relacionaremos estas técnicas con el concepto de variabilidad.

### 5.5.2 Variabilidad en las condiciones de entrenamiento

En los últimos años, la investigación en entrenamiento deportivo está contemplando la introducción de condiciones variables en el entrenamiento como una forma de inducir la mejora en los mismos (Schöllhorn et al., 2006). Sin embargo, hasta el momento han sido pocos los casos en que la introducción de esa variabilidad está sujeta a restricciones en función de los objetivos de aprendizaje en el entrenamiento, de forma que en la mayor parte de los casos las variaciones son introducidas sin criterios explícitos sobre su rango u otras características. ¿Por qué la variabilidad afecta el entrenamiento? ¿Qué tipo de variabilidad es útil y qué tipo de variabilidad no lo es? La teoría descrita en el presente artículo permite plantear criterios objetivos para responder a estas preguntas (cf. Huet et al., 2011).

En este sentido, una primera observación relevante es que la introducción de variabilidad en las condiciones de entrenamiento afecta la utilidad y la variabilidad de las variables informacionales disponibles al observador. Usando el ejemplo de  $\tau$  expuesto en la Sección 5.2, si los objetos que se nos acercan tienen siempre el mismo tamaño y la misma velocidad, entonces tanto la variable  $\tau$  como la variable  $\theta$  son específicas al tiempo de contacto. Sin embargo, si se introduce variabilidad en el tamaño real de los objetos, entonces la variable  $\theta$  pierde su especificidad y, con ello, parte de su utilidad, mientras la especificidad de la variable  $\tau$  se mantiene.

En la Sección 5.3.2 hemos visto que la utilidad relativa de las variables informacionales disponibles afecta al proceso de aprendizaje. Por lo tanto, podemos formular la hipótesis de que la variabilidad afecta al aprendizaje a través de la utilidad de las variables. Esta hipótesis implica criterios sobre cómo ha de introducirse la variabilidad. Por ejemplo, se deduce de ella que la variabilidad debería ser tal que redujera la utilidad de aquellas variables informacionales que el entrenador quiere evitar que sean utilizadas. Si, al contrario, la variabilidad reduce la utilidad de aquellas variables informacionales cuyo uso quiere promover el entrenador, ésta tendrá un efecto negativo<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Si la especificidad de una variable informacional está garantizada por constricciones glob-

Se pueden derivar hipótesis más precisas del aprendizaje si lo explicamos por medio de una función de utilidad. Según esta teoría, la variabilidad afecta al aprendizaje en la medida en que afecta a la función de utilidad. En Huet et al. (2011) se encuentra un ejemplo de cómo la variabilidad afecta a la función de utilidad y, posiblemente como consecuencia, al aprendizaje. La variabilidad será beneficiosa si maximiza la inclinación de la función de utilidad. En resumen, cuanto más se sepa sobre el espacio informacional de una tarea dada, y sobre cuál es la función de utilidad, mejores serán las predicciones de los efectos de la variabilidad sobre el entrenamiento. Del mismo modo, algunos de los estudios que demuestran un efecto beneficioso de la variabilidad se pueden interpretar como apoyo experimental para la teoría expuesta en este artículo.

### 5.5.3 Métodos adaptativos

De lo tratado hasta este punto podemos deducir que la rapidez del proceso de educación de la atención depende de las circunstancias del entrenamiento. En la Sección 5.3.2 hemos visto evidencia de que dicho proceso se produce más rápido si se reduce la utilidad de la variable no específica inicialmente usada. Ahora bien, la ejecución inicial de diferentes participantes se ajusta a diferentes variables informacionales (e.g., Jacobs et al., 2001), lo que significa que para obtener un entrenamiento eficiente, se tiene que reducir la utilidad de diferentes variables informacionales para diferentes participantes. Además, como los participantes cambian en el uso de variables informacionales durante el entrenamiento, lo anterior implica que lo más eficaz podría ser un entrenamiento adaptativo, en el cuál se analiza *online* qué variable informacional usa un observador para adaptar las condiciones de entrenamiento a ello de manera continua. Obsérvese que este tipo de entrenamiento requiere poder analizar qué variables son usadas y poder adaptar las condiciones durante el entrenamiento. Por ello, tal entrenamiento será factible sobre todo para entrenamientos controlados por ordenador en entornos de realidad virtual.

---

ales, que no son fáciles de violar, entonces es poco probable que la variabilidad reduzca su utilidad. Aquellas variables informacionales cuya especificidad está garantizada en un rango amplio de condiciones se les suelen denominar *invariantes* (Gibson, 1979).

## 5.6 Conclusiones

El objetivo del presente trabajo es describir nuestra visión del enfoque neogibsoniano e indicar las implicaciones del enfoque para el diseño de programas de entrenamiento. El punto de partida del enfoque neogibsoniano (y de otros enfoques ecológicos) es el reconocimiento de la riqueza de la información en el nicho ecológico. Con este reconocimiento, el aprendizaje se ve como un proceso de aprender a usar la información ya disponible, y no como un proceso de aprender a enriquecer estímulos empobrecidos que son necesariamente ambiguos. De ahí se derivan tres procesos de aprendizaje: la educación de la intención, la educación de la atención, y la calibración. De estos tres procesos, el presente trabajo se ha centrado en la educación de la atención. Este proceso se ha descrito como un movimiento continuo en un espacio informacional y se han considerado dos maneras de entender estos movimientos: el aprendizaje por función potencial y el aprendizaje directo.

La aportación principal del enfoque neogibsoniano al ámbito del estudio del deporte reside en su capacidad de describir las variables informacionales disponibles para determinadas tareas y, asociado a ello, la metodología para determinar el uso de tales variables. En segundo lugar, comparando las variables que se usan antes y después de un entrenamiento, o durante un entrenamiento, esta misma metodología permite mejorar nuestro conocimiento de la parte del aprendizaje que se denomina la educación de la atención. En tercer lugar, tal y como hemos visto en las Secciones 5.3.2 y 5.4.3, un conocimiento del proceso de la educación de la atención permite diseñar las condiciones de entrenamiento que facilitan la mejora en el rendimiento deportivo.

---

## Chapter 6

# Applications to Robotics

The ongoing and increasingly important trend in robotics to conceive designs that decentralize control is paralleled by currently active research paradigms in the study of perception and action. James Gibson's ecological approach is one of these paradigms. Gibson's approach emerged in part as a reaction to representationalist and computationalist approaches, which devote the bulk of their resources to the study of internal processes. The ecological approach instead focuses on constraints and ambient energy patterns in the animal-environment coalition. The present article reviews how the emphasis on the environment by ecological psychologists has given rise to the concepts of direct perception, higher order information, active information pick up, information-based control laws, prospective control, and direct learning. Examples are included to illustrate these concepts and to show how they can be applied to the construction of robots. Action is described as emergent and self-organized. It is argued that knowledge about perception, action, and learning as it occurs in living organisms may facilitate the construction of robots, more obviously so if the aim is to construct (to some extent) biologically plausible robots.

## 6.1 Introduction

Since the late 80s, research in robotics and artificial intelligence has witnessed the emergence of a paradigm, called behaviour-based robotics, that reacts against the traditional model of intelligence as deliberative reasoning (Brooks, 1991; Connell, 1987). Instead of focusing on how a computer program can beat a human chess master, or on how to control an industrial robotic arm to perform faster and more accurate movements, proponents of this paradigm argue that a more suitable model for intelligence research would be adaptive behaviour. Behaviour-based robotics emphasizes how agents are engaged in an ongoing interaction with their environment, and how they continuously adjust their behaviour tuning internal and external processes to realize their goals (Beer, 1990).

As an example of the type of adaptive behaviour that we are referring to, consider the ability of insects to compensate for a lost leg (cf. Effken & Shaw, 1992). An adaptive self-assembly of the system maintains the organism within the functional range to achieve a given goal, in this case, locomotion. Different neurons, muscles, or limbs may be recruited to achieve the final goal (Wilson, 1980). In the same vein, behaviour-based robotics attempts to build robots through networks of simple but functional behaviours, often mapping sensors to actuators without use of a central model (Brooks, 1986, 1989; Connel, 1990). This flavour of robotics shares a common theoretical ground and has strong parallels with ecological psychology.

Ecological psychology, as developed by Gibson (1950, 1966, 1979), affirms that animal and environment constitute a functional unit, a coalition: “animal and environment make an inseparable pair. Each term implies the other. No animal could exist without an environment surrounding it. Equally, although not so obvious, an environment implies an animal to be surrounded” (Gibson, 1979). In the ecological view, “a coalition is not a system plus context, but the minimal system that carries its own context” (Turvey, Shaw, & Mace, 1979). Therefore, if laws of behaviour exist, they are to be found at the ecological scale, that is, in the animal-environment coalition.

Introducing the environment to understand animal behaviour vastly changes the scientific challenge. Because the environment is highly structured due to natural laws, animals do not need explicit knowledge inside their heads to develop meaningful behaviour, they just need to be tightly coupled to their environments. In a nutshell, it is easier to put the organism into the environment than to put

the environment inside the organism. The general strategy of ecological psychology is to push explanations of cognition based on natural law as far as possible (Duchon, Kaelbling, & Warren, 1998). As described by Carello, Turvey, Kugler, and Shaw (1984), this strategy reduces or even replaces the need for more traditional explanations in term of symbolic and representational processes, which are derived from the digital-computer metaphor.

Both behaviour-based robotics and the ecological approach eschew explanations based on central models in favour of distributed control, and both do so by focusing on the action capabilities of the agent and on the environment. Given these parallels, in the present contribution we set out to review aspects of the ecological approach that we consider relevant to roboticists. Reviewed concepts include higher-order variable, invariant, active information pick up, direct perception, control law, and prospective control. Representative examples of psychological research are included, and the work of Duchon et al. (1998) is featured as an example of how these concepts can be applied in the construction of robots. In the later part of the contribution, attention is devoted to an ecological approach to learning, referred to as direct learning, and to the dynamics of action.

## 6.2 Visual system and direct perception

The ecological theory of visual perception was proposed by Gibson (1979), who claimed that perceiving is not about minimizing noise in “sensory channels” in order to build a detailed and reliable representation of the state of affairs in the world. On the contrary, energy arrays in the environment are highly structured due to constraints that limit their possible states, and hence make perception possible. For instance, a necessary condition for visual perception is the existence of the laws of optics, which determine how a ray of light will behave under different circumstances. If the laws of optics did not hold, visual perception would not be possible.

Many different constraints lawfully determine a wide set of relationships among measurable magnitudes in environmental energy arrays, some of which are complex to describe (for scientists at least) and extended over substantial spatial and temporal intervals. In the ecological jargon, more sophisticated properties of ambient energy arrays are called higher order variables, in order to contrast them with more elementary ambient energy properties, or lower order variables.



Contrary to elementaristic approaches (see Fodor & Pylyshyn, 1981), ecological psychology rests on the assumption that higher order variables can be detected without requiring inferences or intermediate symbolic states. No matter how complex the relationships between magnitudes are, perceptual systems may be entailed with the capacity to detect them. Because no cognitive intermediaries are needed in the detection process, perception is said to be direct (Michaels & Carello, 1981).

Renowned examples of higher order variables are found in optic flow. Optic flow can casually be defined as the movement of the projections of objects and surfaces as seen from a point of observation. Optic flow can be represented with a vector field, with each vector indicating the direction and speed of the movement. If the vectors point outwards, the point of observation approaches a surface; if the vectors point inwards, the point of observation retreats. Furthermore, if approaching, the node without flow from which the vectors emerge, referred to as the focus of expansion, indicates the location toward which the point of observation is heading. A substantial part of the ecological approach is devoted to the study of higher order variables in optic flow, in static optic arrays, and in other ambient energy arrays (related to audition, touch, etc.).

Some of the higher order variables in the energy patterns are specific (one-to-one related) to properties in the environment that are relevant to the control of action. Such specifying higher order variables are called invariants. Whenever invariants are detectable in the energy arrays, they will invariably allow for the perception of the relevant environmental property. A canonical example of an invariant is the abovementioned focus of expansion, which specifies heading direction. Another canonical example is the optical variable  $\tau$ , which specifies the time to contact between the point of observation and a surface or an object, given that the current velocities remain unchanged (Lee & Reddish, 1981; cf. Jacobs & Díaz, 2010).

To illustrate the use of these concepts in robotics, let us briefly consider the work of Franceschini and collaborators (2009). Using knowledge about the physiological basis of elementary motion detectors of the housefly, these authors designed small optic flow sensors. They constructed and tested lightweight (tethered) helicopters that were endowed with flow sensors and simple control systems. In contrast to more traditional autopilots that use knowledge about (or representations of) quantities such as groundspeed and flight altitude, the autopilots

successfully control aspects of flight (such as the lift, cf. Ruffier & Franceschini, 2003, 2008) on the basis of the detected flow.

At this point it is important to note that animals are not passive: to make their way in the world, they actively explore their environment, seeking possibilities to achieve their goals through actions, and generating sensory flows that can help to control those actions (Gibson, 1966). Therefore, perceiving is not passively receiving invariants that happen to stimulate the sensory surfaces (this could be considered a degenerate case of normal perception), but an active picking up of the invariants. Rather than complicating the task, active perception brings new constraints into the animal-environment system (cf. O'Regan & Nöe, 2001). Hence, the notion of active perception allows ecological psychologists more opportunities to identify invariants in the ecology of the studied organism.

Methodologically, an ecological psychologist studies the possible informational invariants that guide particular actions, and the constraints that hold during the task and that guarantee the specificity of perceptual invariants. There are many laws (or law-like regularities) that provide constraints to the perception-action loop, and many ways of classifying them. A classification that may be of use for a designer of artificial adaptive systems is based on their degree of generality. We can distinguish: 1) universal constraints, based on mathematical, physical, chemical or biological laws (e.g., gravity, geometrical and physical optics, or physiological laws valid across taxa); 2) ecological constraints, valid for the members of a certain species, such as the construction of the body and the limbs; 3) task-dependent constraints, only valid for the very specific combination of events and layouts present in a task (e.g., predator-prey interactions, experimental manipulations, or the rules of a game).

In contrast to the computational paradigm, the ecological approach assumes that knowledge of constraints is not explicitly encoded in a set of cognitive symbols and abstract rules, but is implicit in the fine-tuned co-organization of environment and agent –their coalition (Carello, Turvey, Kugler, & Shaw, 1984). Although it is logically possible to conceive a symbolic system that behaves indistinguishably from its ecological counterpart, we consider it misleading to include more components than needed in the explanans (in addition to the epistemological puzzles that symbolic theories of perception imply, Turvey, Shaw, Reed, & Mace, 1981; Shaw, Turvey, & Mace, 1982). For ecological psychology, perceptual systems are smart devices (Runeson, 1977): they adaptively rearrange biological

components to generate soft-assembled dynamical structures that take advantage of constraints in an opportunistic fashion—that is, without requiring explicit knowledge—in order to sustain an adaptive coupling with the environment.

The technical challenge of designing an artefact analogous to a soft-assembled smart device might seem titanic. This is indeed the case. We must not forget the large number of adaptation scales living systems are subject to. Couplings with the environment are shaped by adaptations from the scale of evolution to the scale of perception-action down to yet smaller scales. Given the overwhelming pool of adaptive resources that life is made of, it is not possible to provide an exhaustive account of behaviour with only one of those scales (e.g., perception-action). A more integrative perspective on the concept of adaptation is required. Recent robotic platforms (Tsagarakis et al., 2007; Murphy, Saunders, Moreira, Rizzi, & Raibert, 2011) may be a good test-bench for this. After addressing perception-action (Section 6.3), an example of ecological robotics (Section 6.4), and the notion of prospective control (Section 6.5), we therefore consider the issues of calibration and learning (Sections 6.6 and 6.7).

## 6.3 Perception-action loops as control laws

The previous section described reliance on optic flow invariants as a means to control intended actions. Control laws formalize the operation of action upon detected invariants at a convenient level of abstraction. The specific control laws ecological psychologists are interested in are mappings between task-specific informational variables and action variables that describe the observed behaviour (Warren, 1988; see also the concept of task compliant control in the engineering literature, Nakanishi, Cory, Mistry, Peters, & Schaal, 2008). If behavioural regularities are observed at the selected level of abstraction, then actions depend in a systematic way on information due to the mutual constraints expressed in the control law.

According to what is controlled, there are several possible formulations for these control laws, each one with its strengths and weaknesses. Kinematic control laws are functions that relate informational variables directly to kinematic movement variables (such as position, velocity, or acceleration) and kinetic control laws relate information to the forces that produce the final movement. Influential examples of kinematic control laws can be found in  $\tau$  coupling theory (Lee,

1998), a theoretical framework that aims to understand movement trajectories as determined by the continuous coupling of two task-relevant and reciprocal  $\tau$  variables. Despite the wide theoretical use of kinematic control laws, kinetic control laws appear better suited to roboticists because they avoid the often-problematic inverse kinematics problem. The control laws given in Sections 6.4 and 6.5 are kinetic control laws.

Both types of control laws (i.e., kinematic and kinetic) are defined at a level of abstraction that spans the entire action system, neglecting the relevance of the action system in shaping behaviour. Dynamic control laws, in contrast, do not directly determine movement parameters, but modulate the dynamics of the action system (Warren & Fajen, 2004; Warren, 2006), which in turn determine the movement parameters. A more mathematical portrayal holds that dynamic control laws specify a vector field with attractors and repellers on the low dimensional manifolds where the trajectories of the action system unfold, hence generating the actual movement kinetics and kinematics. This is the more complete but also the more challenging approach to the concept of control law. The approach is more challenging because control laws relating information flows and action-system dynamics cannot be directly measured. At least some hidden dynamical variables must be inferred, for instance from behavioural analysis (cf. Warren & Fajen, 2004).

An example of a dynamic control law can be found in the work of de Rugy and collaborators (2002). The authors of this article extend an existing dynamical model about the emergence of locomotion from the interaction of neural, musculo-skeletal, and environmental elements (Taga, 1998). The extension consists of the online coupling of a model parameter, related to step length, to a higher order informational variable related to the adequacy of the current step length. We return to issues concerning action dynamics in Section 6.8.

## 6.4 A robotic implementation of visually guided locomotion

The work of Duchon et al. (1994, 1995, 1998) illustrates how robotic systems can be developed on the basis of concepts from ecological psychology. These authors built robots that produce basic locomotive behaviours using kinetic control laws defined with optic flow variables. Their robots avoid obstacles. A simple strategy

to regulate such behaviour is to equate the optic flow in the lateral portions of both hemifields. This strategy has been shown to be used by bees flying down a corridor (Srinivasana, Lehrera, Kirchnera, & Zhanga, 1991). Several control laws can be given that are related to this strategy. One of these is:

$$\Delta(F_L - F_R) = k \cdot \frac{\sum \|\vec{w}_L\| - \sum \|\vec{w}_R\|}{\sum \|\vec{w}_L\| + \sum \|\vec{w}_R\|} \quad (6.1)$$

In this equation,  $\Delta(F_L - F_R)$  is the force difference as applied to the two sides of the agent's body,  $k$  is a constant, and  $\sum \|\vec{w}_L\|$  and  $\sum \|\vec{w}_R\|$  are the sums of the lengths of the optic flow vectors on each side of the focus of expansion (each side of the middle of the field of view, in the case of Duchon & Warren, 1994). Note that this strategy exploits constraints on optic flow due to the relative distance of objects: Closer objects give rise to stronger optic flow, and, for similarly sized objects, they take up more space on the optic array, biasing the ratio towards their associated flow. This causes the robot to turn away from nearby objects, without turning into another object.

Duchon et al. (1998) describe implementations of this control law on two robots. The smaller robot was endowed with a camera with a horizontal field of view of  $60^\circ$ , with the ability to detect four frames per second of a  $128 \times 32$  flow field. The larger robot had a field of view of  $110^\circ$  and was able to detect 10 frames per second, of a  $128 \times 92$  flow field. This allowed the smaller robot a maximum safe speed of 4 cm/s and the larger one a maximum safe speed of 30 cm/s. The robots were tested in poorly lit and cluttered environments, with tables and chairs, people, and wires on the floor. Two "emergency reflexes" were added to the smaller robot because it sometimes navigated in the challenging light conditions under the table tops. An intensity reflex stopped and turned the robot when no flow was detected (either too dark or too bright), and an immediacy reflex produced the same response when a detected  $\tau$  specified that a collision was imminent (remember that  $\tau$  is an optic flow variable related to time-to-contact). In the larger robot, in addition to the main control law, a control law that regulated speed as a function of the total magnitude of the optic flow was implemented.

Both robots were able to wander through their environments, demonstrating the utility of the control law. Interesting results were also obtained in simulation

experiments, which allow more convenient explorations of the space of possible behaviours, and of the relationships between parameters and behaviours. For instance, in simulations of a single agent moving at a fixed speed in a fixed environment, the emergent behaviour converged toward one of a few attractors, even though the simulations started from random positions and orientations. Adding noise to the system generated transitions between the attractive paths. Variations of the field of view dramatically affected performance. Narrow fields ( $60^\circ$ ) resulted in less adapted behaviour, with the agent often getting stuck in a corner. Fields wider than  $180^\circ$  also resulted in degraded performance because the agent tended to respond to obstacles that were already avoided. Varying the speed of the agent changed the detection of passability of gaps. The faster the agent, the more conservative with respect to gaps. Duchon et al. (1998) also describe the implementation of control laws that use optic flow information to allow the chasing of and fleeing from moving targets (cf. Duchon et al., 1995).

It is worthwhile to emphasize that the movement of the robots in the experiments by Duchon et al. emerge on-line from the agent-environment interaction. The robots do not plan paths in advance. They do not apply internal algorithms that optimize the length, energy expenditure, safety, or other aspects of the paths. They do not follow a scheme in which perception, cognition, and action are independent and sequential processes. The robots do not have internal maps, and no internal entities can usefully be interpreted as symbolic representations of, say, objects, other robots, or the robots themselves. These aspects make the systems consistent with ecological psychology and behaviour-based robotics, and set them apart from a substantial number of other theories and approaches.

## 6.5 Prospective control

So far in this article we have described the ecological concepts of higher order information, invariant, and control law, and we have seen how such concepts can be applied in robotics. The general ecological argument is that the more useful the detected information, the less the need for hypothetical internal processing. A particular type of internal processing that can be obviated in this way is the (often computationally intensive) compensation of delays through predictive processing. The part of the ecological theory that concerns such issues makes use of the concept of prospective control.

In environments with moving objects, action is often controlled with respect to future states of the environment. For instance, in catching fly balls in baseball, catchers do not run towards the current location of the ball, but towards a future location where the ball may be intercepted (e.g., in many cases they run backwards while the current location of the ball is in front of them). To accommodate such findings, a broad class of theories, referred to as predictive theories, assume that agents detect information about current states, apply internal simulation models to predict future states, and then control action using the internal predictions of the future states (Mehta & Schaal, 2002). This type of control is thought to be necessary especially for controllers with sensory-motor delays because, the argument goes, such controllers would otherwise apply forces that are computed on the basis of states of the environment that are in fact past states at the time that the forces are applied.

The theory of prospective control does not accept this argument. Prospective information can be defined as information that specifies future states of the environment, future states of the agent, or future states of the agent-environment relation (Kim & Turvey, 1998). An example of prospective information is the above-described focus of expansion of the optic flow. This higher order variable specifies at which point the agent will contact the approached surface if the current movement directions remain unchanged. If the agent detects prospective information, it perceives future states. Perceiving future states, in turn, obviates the need to obtain the future states through predictive internal simulations.

As a second example of prospective information we can consider an approximately sinusoidal environmental process. The state of such a process .1 s into the future can be predicted/approximated from the current position and velocity, using, say, an internal Euler simulation. Alternatively, one may detect the fractional derivative of the sinusoidal signal. A fractional derivative of non-integer order  $\alpha$  of a function  $f(t)$  is an extension of the usual concept of derivative and can be denoted as  $f^\alpha(t)$ . Although fractional derivatives may perhaps be more difficult to detect than regular first-order derivatives, it can be shown that fractional derivatives specify future states of sinusoidal processes (Jacobs, Vaz, & Michaels, 2012). Detecting fractional derivatives hence allows agents to control action with regard to future states of the environment, without need of Euler-like internal predictions.

Among the more substantial bodies of research on prospective control is the

work related to the optical acceleration strategy (e.g., Chapman, 1968; Fink, Foo, & Warren, 2009; Zaal & Michaels, 2003) and to the bearing angle strategy (e.g., Bastin, Craig, & Montagne, 2006; Morice, François, Jacobs, & Montagne, 2010). The bearing angle strategy holds that in order to intercept horizontally moving targets, humans and other species move so as to cancel changes in the bearing angle, which is defined as the angle between the direction of movement of the agent and the current direction of the to-be-intercepted target as seen from the perspective of the agent. It has been suggested, to give two examples, that such a strategy may be applied by dragonflies in the pursuit of prey (Olberg, Worthington, & Venator, 2000) and by drivers in the crossing of intersections (interpreted as the interception of moving traffic gaps, Louveton, Bootsma, Guerin, Berthelon, & Montagne, 2012). The bearing angle strategy is ecological (and prospective) because it does not require predictions about where and when the interception takes place. Instead, the agent detects and uses information that specifies whether the current agent-environment relation, in the absence of changes in speeds and directions, leads to a future interception.

The optical acceleration strategy concerns the interception of fly balls. Imagine a fly ball that requires only forward-backward movement of the agent in order to be intercepted (i.e., no lateral movement). Given the constraint that terrestrial gravity is approximately constant, it can be shown that the current speed of the agent leads to interception if and only if the tangent of the angle between the horizontal and the line from the agent to the ball increases at a constant rate (Chapman, 1968). In other words, this variable indicates whether or not the agent needs to change his or her speed: If the optical acceleration is non-zero, the agent needs to accelerate or decelerate. Evidence indicates that human behaviour is indeed consistent with an optical acceleration strategy (Fink, et al., 2009; Zaal & Michaels, 2003). An example of how this type of research may inspire roboticists can be found in Miyazaki and Mori (2004). We now turn to the issue of learning.

## 6.6 Learning of visually guided action

A kinetic control law, as described in Section 6.3, can be formalized as follows:  $F = f(I)$ , in which  $F$  is the exerted force,  $f$  is a single-valued function, and  $I$  is the operative informational variable. Such control laws should not be considered as hard-wired and unchangeable. On the contrary, empirical evidence indicates



that perceivers change in which informational variable they use and in the single-valued function that maps the used variable to force (Fajen, 2008; Jacobs & Michaels, 2006; Stanard, Flach, Smith, & Warren, 2012). In laboratory tasks, it is possible to impose constraints that turn highly useful variables into less useful ones, and vice versa. In such situations participants tend to converge towards the variables that are useful in their specific experimental environment. In the Gibsonian tradition this kind of adaptation is called the education of attention (Gibson, 1966), because participants change with respect to what higher order informational variable they attend to.

For the sake of simplicity, let us assume that  $F = k \cdot I$ . In other words, we assume that the exerted force,  $F$ , is directly proportional to the detected variable,  $I$ . In this portrayal, in addition to  $I$ , the value of  $k$  is subject to adaptation: one may be attending to a useful informational variable but not using it correctly to achieve a successful action. This kind of adaptation, called calibration, has been observed in several empirical studies (e.g., Jacobs & Michaels, 2006). The education of attention and calibration are adaptive processes that ensure the specificities required by control laws to generate meaningful behaviour, from birth till death. For novel tasks—which imply new sets of constraints—some invariants are no longer useful, while other invariants appear. The role of the education of attention and calibration is to rearrange the system on a slower timescale in order to maintain the necessary specificities on the faster timescale of the perception-action control laws.

There is evidence that suggests that changes due to the education of attention are continuous rather than discrete. Usually organisms do not jump from the use of one informational variable to the use of a completely different one. Rather, the new variables used by participants tend to produce only slightly different outcomes, which is to say that organisms change to variables that have similar levels of utility. To account for this continuity, Jacobs and Michaels (2007) proposed that informational variables can be portrayed as forming a continuous space, referred to as information space (cf. Stanard et al., 2012). When appropriately defined, such a space should contain all the variables that individuals exploit for a task. Each point in the space represents a different informational variable, and each variable offers a different level of support to performance.

To illustrate the notion of information space, we consider a recent study on learning to balance a pole attached to a cart that can be moved in one dimension

(Jacobs et al., 2012). This cart-pole study also illustrates the concepts of control law and prospective control. The starting point of the work is the assumption that the manual control of the cart depends on visual information, namely, optical correlates of the angle of displacement of the pole from the vertical,  $\theta$ , and its rate of change,  $\dot{\theta}$ . To obtain a one-dimensional information space that includes these variables, the notion of fractional derivative is used (see previous section). The fractional derivative of order  $\alpha$  of  $\theta$  is denoted as  $\theta^\alpha$ . The closer the value of  $\alpha$  to 0 or 1, the more similar the variable to  $\theta$  or  $\dot{\theta}$ , respectively. The parameter  $\alpha$  can be interpreted as the coordinate of a one-dimensional space, the information space, and changes in which informational variable an individual uses can be tracked as a movement in the space.

This information space, and the additional assumption of a constant perceptuo-motor delay,  $d$ , allows the formulation of the following control law:  $F(t) = k \cdot \theta^\alpha(t - d)$ , where the force at time  $t$  is said to be specific to the  $\alpha$ -th fractional derivative of  $\theta$   $d$  seconds before. Performance of individuals, as described by this control law, is determined by a point in the information space and a calibration constant. Thus, the performance of participants at any time during learning can be described as a point in a joint information-calibration space  $(\alpha, k)$ .

Participants in the experiment reported in Jacobs et al. (2012) practised the pole-balancing task until their performance reached a criterion level. The movement of the cart-pole system was registered, and the equations of motion of the system were used to compute the forces exerted during the balancing. These forces allowed the authors to determine the locus in the information-calibration space that best explained performance, for each individual and at each moment of the learning process. Learning indeed went together with movements in the space, indicating changes in which variables were used (education of attention) and changes in the value of  $k$  (calibration). More precisely, this portrayal showed a narrowing of the distributions of the loci of participants in the space. That is, smaller ranges of the parameters were used as the learning progressed. Also shown was a tendency in the distributions to gradually shift toward lower values of  $\alpha$ . Simulations confirmed that this movement in the space corresponded with a movement towards the more useful loci (i.e., towards the loci that allowed more stable performance).

These results can be interpreted in terms of prospective control. Controlling a cart-pole system on the basis of  $\theta$  is difficult because even a small perceptual-

motor delay makes the control unstable. Fractional derivatives of  $\theta$ , however, approximate the value of  $\theta$  a small time interval into the future. Controlling the cart-pole system with a perceptual-motor delay and on the basis of a fractional derivative is therefore, to some extent, equivalent to a hypothetical control based on a delayless use of  $\theta$ . This experimental work is hence an illustration of the fact that prospective information may obviate the internal processing that is often supposed to be necessary to compensate perceptual-motor delays.

To summarize, instead of scrutinizing hypothetical internal processes, the ecological approach devotes resources to the search for higher order variables, and to experimental tests of whether or not organisms use these variables. Particularly useful are prospective variables. The ecological research programme may inspire roboticists to devote resources to the development of sensors that detect higher order variables. Furthermore, the psychological research indicates that learning can at least partly be understood as changes in which informational variables are detected. For roboticists this implies that in order to be biologically plausible, it may be necessary that learning be at least partly implemented as change in the sensors that detect higher order variables. The next section provides more detail on how such change is effected.

## 6.7 Direct Learning

Control laws allow action to unfold without need of internal cognitive processes such as path planning, and without symbolic representations of objects in the environment. This is because the moment-to-moment action, rather than being based on previously planned paths, is a direct function of higher order information. In the previous section it was argued that control laws are continuously adapted due to changes in variable use and calibration. One might wonder, then, whether in contrast to the action itself, these changes in the control laws require internal processes and representations. That is, do education of attention and calibration require cognitive/symbolic mechanisms to decide when and how to change variable use and calibration? The theory of direct learning claims that this is not the case (Jacobs & Michaels, 2006; Jacobs, Ibáñez-Gijón, Díaz, & Travieso, 2011).

The reasoning behind the theory of direct learning is analogous to the reasoning behind the theory of direct perception, which holds that perception is specific

to higher order information instead of being an internal construal achieved by symbolic processes. Hence, the theory of direct learning claims that changes due to learning are specific to higher order information. As do other parts of the ecological theory, this claim implies a methodological doctrine for those who aim to understand learning: rather than devoting research efforts to the elaboration of hypothetical internal processes that supervise learning, the theory of direct learning suggests such efforts be devoted to searching for sources of information that guide learning. We next describe a study by Bruggeman, Zosh, & Warren (2007) as an example that may be interpreted from the framework of direct learning.

Bruggeman et al. (2007) performed their study in a large virtual reality environment. In the normal use of this virtual environment, the actual walking direction of participants is registered and converted without manipulation in a walking direction in the virtual world. In the experiment reported in Bruggeman et al. (2007), however, this relation was purposely manipulated by displacing the virtual walking direction  $10^\circ$  to the right. Initially, the walking paths of individuals showed important deviations in the direction of the  $10^\circ$  displacement, but, while perceiving and acting in the manipulated environment, the deviations got smaller and smaller. From a direct learning perspective two questions arise. First, what is the change in the operative informational variables (education of attention) and/or in the control laws (calibration) that underlies the reduction of the deviations? And second, what is the information for learning that specifies such change?

The research of Bruggeman et al. (2007) relates to the second question. Consider a first hypothesis. Hypothetical individuals that are perfectly adapted are expected to walk straight towards virtual targets. Curved paths are expected, in contrast, for individuals who walk through the manipulated virtual world with a deviation to the right. This is so because, without changing the direction of walking, these individuals would pass the target on the right, and would thus see the target drifting to the left. To cancel the drift such individuals continuously turn to the left. In sum, walking on straight trajectories is indicative of a well-adapted visuo-motor system, and walking on curved trajectories is indicative of an ill-adapted visuo-motor system. As a consequence, establishing an appropriate coupling between the amount and direction of curvature and the change in the visuo-motor system leads to a system that sooner or later converges to being well adapted. In the jargon of the direct learning theory, one would say that the

curvature (detectable by vision, proprioception, or both) is a candidate variable that may serve as information for learning.

A second hypothesis considered by Bruggeman et al. (2007) relates to the above-described focus of expansion of the optic flow. For a well-adapted individual who walks straight towards the virtual target, the focus of expansion remains on the target. In contrast, for an individual who walks through the virtual world according to the  $10^\circ$  mismatch of the physical and virtual walking directions, the focus of expansion is located  $10^\circ$  to the right of the target. This means that a mismatch between the focus of expansion and the virtual target is indicative of an ill-adapted perceptuo-motor system, and hence that this higher-order flow variable may guide the adaptation. The research reported in Bruggeman et al. (2007) provides empirical support for the second hypothesis: the control of walking is adapted based on information related to optic flow more than on information related to trajectory curvature.

As interpreted from the direct learning perspective, the study reported in Bruggeman et al. (2007) is an example of how researchers may search for information that specifies change due to learning. Other experiments that aim to reveal information for learning can be found in Michaels and Romaniak-Gross (2012) and Jacobs, Silva, and Calvo (2009). For roboticists it is of interest to know candidate variables for information for learning. Detecting such variables and coupling them to the change in perceptuo-motor systems may lead to robots that adapt to changes in the constraints in the environment in which they operate (and/or to changes in the robots themselves). In addition, if the aim is to achieve biologically plausible robots, then the detected information for learning should correspond to candidates that have been supported by psychological research. Note again that, instead of being planned by a cognitive/symbolic system (inspired by the computer metaphor, Carello et al., 1984), such learning lawfully emerges from the on-line interaction of agent and environment.

## 6.8 Dynamics of the action system: the Bernstein perspective

One of the aspects that behaviour-based robotics and ecological psychology have in common is the considerable attention paid to adaptive processes. In Section 6.6 we described the calibration and the education of attention. With a formulation

of a control law as  $F = f(I)$ , these processes correspond to changes in the single valued function,  $f$ , and in the operative informational variable,  $I$ , respectively. Although our examples imply definitions of the exerted force,  $F$ , we did not consider details about how biological agents generate such forces. Neither did we consider learning processes that concern the way in which the forces are generated. It may be useful for roboticists, however, to be aware that action is currently conceived as being to a large extent emergent and self-organized. In this section we briefly indicate a few aspects of the large and active research field on the dynamic organization of action.

The production of skilled action requires the coordination of large numbers of elements in the musculoskeletal system. Typically considered elements are: joints, entire muscles, smaller muscle units, etc. Nikolai Bernstein (1996) formulated this control problem as the now-well-known “degrees of freedom” problem: a control system has to select, within the many-dimensional motor system, a specific combination of activations of effectors to produce a desired movement, which is low-dimensional compared to the movement apparatus itself. Due to the high number of dimensions of the effectors with respect to the task, there are equivalent solutions for each intended trajectory. This redundancy in degrees of freedom is a resource for the simultaneous flexibility and stability achieved by the motor system. The redundancy facilitates motor learning, seen as exploration of adaptive possibilities within the high dimensional action system.

In Bernstein’s view (1996), the motor system is organized in levels that emerged at different phases of the phylogenetic process. Bernstein distinguished four levels: A) *the level of tone*, which is the oldest level in an evolutionary sense, with a particular concern for trunk and neck muscles; B) *the level of muscular-articular links*, or synergies, which, mainly concerned with the extremities, relies on proprioceptive afference to make collections of degrees of freedom act as a single functional unit; C) *the level of space*, which concerns the integration of movements with the spatial layout of the environment, relying, for instance, on sensory information from visual and auditory systems; and D) *the level of action*, which is the youngest level in an evolutionary sense and the most typically human level, concerning the intentional control of movements and the framing of individual movements into chains of goal-directed actions. According to Bernstein, movements are controlled by a leading level (in humans typically level C or D), but the leading level crucially relies on lower background levels without being

concerned with the aspects of the movements that are addressed by these lower levels.

The dynamical systems approach has provided insights to understand coordination as the soft-assembly of degrees of freedom into low dimensional manifolds (Kugler & Turvey, 1987). Rather than specifying all the details of the required force-time profile to be exerted by the effectors, controlling a complex dynamical system implies setting a set of parameters (typically, of much lower dimension than the system itself), after which the movement emerges from the interaction with the environment according to natural laws. The action system brings constraints and interactions to sustain adaptive behaviour, further constraining cognition with natural laws.

This dynamical systems perspective is consistent with Bernstein's portrayal, according to which the leading level does not plan detailed movements. It does not elaborate a program or script with motor commands for the control of all degrees of freedom. Rather, the final movement emerges from the broad constraints provided by the leading level together with the labour of the lower levels, the respective sensory corrections of the different levels, and the inertial and reactive forces of the body and the environment. The emergent aspect of motor control is also consistent with ecological psychology: Those actions that emerge from multilevel interactions with constraints from the motor system (as well as from the environment) need not explicitly be computed by symbolic cognitive processes.

Without being exhaustive, let us mention that the contributions of dynamical research to the understanding of Bernstein's levels and their interactions include the threshold control hypothesis (also known as equilibrium point theory, Feldman, 1986), the uncontrolled manifold hypothesis (Scholz & Schöner, 1999), the referent configuration hypothesis (Feldman, Gousev, Sangole, & Levin, 2007; Latash, 2010), and the tensegrity hypothesis (Turvey, 2007; Silva, Fonseca, & Turvey, 2010). We mention this research because it provides elegant accounts for the amazing complexity of the control of action, and thereby complements the focus of the present article, which gravitated towards the perceptual side of perception-action systems. We also find it interesting to speculate that the direct learning perspective may be elaborated with (and may contribute to) the Bernstein perspective, raising the question of how interaction with the environment generates different types of information for learning that may specify the different changes due to learning that occur, in parallel, at the different levels of the

construction of movement.

## 6.9 Conclusions

We have outlined how the concepts of information and control as used within ecological psychology may be useful for the design of artificial systems with robust and flexible behaviour, which is to say, behaviour adapted to the environment. This is an objective shared with the approach called behaviour-based robotics. Both ecological psychology and behaviour-based robotics stress that laws of behaviour are to be found in the continuous coupling of agent and environment. This scale of analysis is termed the ecological scale.

Energy in the environment is not randomly distributed but highly structured due to natural laws. Thus, animals do not need explicit knowledge of the state of affairs in the world to develop adaptive couplings. Rather, they need to establish couplings between the action parameters and the higher order invariants in environmental energy fluxes. This type of control is called information-based control, and requires that the agent is capable of detecting the relevant information to control the intended actions. Systems capable of detecting such variables are called smart perceptual systems.

Information-based control can be formalized with control laws in which the controlled action variable and the detected invariants are in a one-to-one mapping. Once a goal is chosen, behaviour unfolds lawfully in a direct loop of perception-action, that is, without meaningful internal states. The work presented in Duchon et al. (1998), is a relevant example of an application of information-based control to robotics.

Another essential feature of information-based control is prospectivity. Computationalist theories often assume that control is predictive to account for goal-directedness. Their decision and control algorithms require future states of the environment as input, typically obtained through predictive internal processes. On the contrary, prospective control is based on prospective invariants that specify either future states of the environment or whether the currently ongoing interactions can achieve the desired goal.

The notion of information space implies the consideration of a continuous space that includes informational variables available in the environment. Information spaces may be useful to account for the continuous changes in performance



that can be observed in animals' behaviour. As an example, we have described a recent study on the informational basis of learning to balance a cart pole (Jacobs, et al., 2012).

Adaptivity of information-based control is granted by processes that update control laws with regard to changes in constraints that hold in a task, or with regard to the acquisition of new skills. The theory of direct learning affirms that there is information for learning in the consequences of our actions, that this information specifies the changes required in the control laws, and that animals are capable of detecting this information. This information specifies the adaptive directionality for learning in information-calibration spaces, thus unloading the agent with the burden of internal inferential processes that keep track not only of their online control, but also the course of their learning.

---

## Chapter 7

### Conclusion

Throughout its brief history, psychology has been strongly influenced by the dominance of mechanistic explanations in science. As a consequence, an ontological gap cuts across psychology. This gap generates ill-defined psychological theories and divides the unitary experience of the subject in incommensurable parts. In this thesis I have presented reflections that seek to overcome that gap by reconsidering the object and methods of psychology. Without denying the usefulness of analytic and quantitative approaches (rather on the contrary, using the appropriate methods to the problems at hand), I have proposed an alternative approach to psychological phenomena rooted in the concepts of the ecological theory of perception. Next I will briefly review the theoretical discussions that frame my research, to subsequently expose the contributions of my work.

The historical revolution that was brought about by the new science of Galileo and Newton led to the adoption of its mechanistic and analytical approach as the model for other scientific disciplines. This process was catalysed by the rise of idealist philosophical theories during the Baroque and later centuries, which embraced the analytical method of mechanics as the epistemological bridge that would connect the spiritual and necessary world of ideas (the thinking substance) with the material and contingent world of objects (the extensive substance). Thus, the rationalist thinking substance (governed by necessary and universal laws of logic) controls the vicissitudes of extensive physical bodies using knowledge about the necessary and universal laws of mechanics. Psychology as a science was born in this split between the body (as a meaningless mechanism that passively receives orders) and the mind (as a logical and ideal construct that gives intellectual meaning to the world according to its purposes). As we learned from

---

Dewey, the application of the concept of reflex arc in psychology –which describes the psychological processes in terms of stimuli, responses, and thoughts– is the expression of the idealistic and mechanistic research program in psychology.

The opposition to the dominance of the physical mechanistic paradigm lost relevance as theoretical and experimental discoveries in the natural sciences took place. Among these advances, those of the formal logic were fundamental for the contemporary development of cognitive sciences. While mechanics and other natural sciences deal with the necessary laws that govern the material world, the advances in formal logic and computation theory allowed, for the first time, plausible and technologically feasible models of the necessary laws governing the immaterial world of ideas. The functional formalization of machines through the concepts of algorithm and formal automata transformed the ontological gap between the world of objects and the world of ideas into the epistemological gap between structure and function. The formal abstraction offered by the concept of algorithm separates the operation of a system from its material structure, which is to say, an algorithm is a logic operation defined independently of the physical medium that carries it out. What characterizes an algorithm is its mapping between input and output states. Physical or chemical necessary laws carry out the symbolic description of a system in structural mechanisms. Thus, the difference between structure and function is merely epistemological, that is, relative to the level of description. The symbolic (functional) and the mechanistic (structural) descriptions are equivalent: They refer to the exact same thing with different words.

Central models of regulation are the expression of the mechanistic distinction between structure and function in behavioral sciences. As a natural continuation of the concept of reflex arc, central models consider behavior as the product of the application of a set of symbolic rules and information processing algorithms that map sensory inputs onto appropriate motor outputs. Therefore, the methodology proposed by mechanistic and idealistic epistemologies consists, on the one hand, in defining more or less arbitrary properties and symbolic relationships that functionally emulate a natural process under a certain simulation context and that are based on the criteria of validity defined by the researcher. On the other hand, a mechanistic explanation requires the implementation of the symbolic algorithms in the structural mechanisms of the system. This approach to behavior is specially suited to the design of sophisticated artificial systems, but

has serious drawbacks when applied to natural behavior.

The fundamental problem of this methodology is that it dissolves the unitary experience of the world that defines an organism either in structural mechanisms that make no reference to experience itself, or in arbitrary formalizations disconnected of the material and relational dimensions of the system because they are imposed by the researcher to account for the complex functional domain of the system. This analytical and reductionist program solves the ontological problems of idealism through the epistemological concept of level of description and the structure-function relationship. However, mechanicism cannot avoid the disintegration of its object that follows the application of its methodology. With the insistent pursuit of universal and necessary laws for all scientific domains, this paradigm fails to capture the most fundamental process of an organism: the establishment of an autonomous historical identity. If we describe an organism from the structural perspective of its mechanisms, its historical identity dissolves in the universality of the laws that govern them, and if we describe an organism from a symbolic perspective of its functions, its autonomy dies out in the arbitrariness of a formalism that only has meaning with respect to an observer that has the knowledge to interpret it.

In this thesis I have defended an alternative scientific approach in which the materiality, the historical identity, and the autonomy of organisms are the fundamental properties that must be assumed and explained. The proposed ecological-dynamical approach defines living organisms as emergent dynamical systems, and has three main differences with mechanistic and representationalist approaches. First, this approach considers that the emergent scales of the processes in a complex system are not merely epistemological (i.e., reducible to alternative descriptions at the level of the components). These processes are ontologically emergent, that is, they have a real existence that is reflected in their operational efficiency to globally constrain structural states. This circular causality between structural and functional domains makes the epistemic reduction of an emergent complex system to structural mechanisms impossible, hence complicating the mechanistic distinction between structure and function and emphasizing the fundamental role of the material constitution of a system.

Second, the proposed approach considers that emergent processes in natural complex systems are constituted upon a generative dialectic with the environment (i.e., a reciprocal coupling with the environment). As a consequence, the rela-

tional domain of a system as a unit of action is necessary to explain the behavior of the system. In this sense, the ecological-dynamical approach does not reject structural descriptions of a complex system. However, both structural and functional descriptions of a system are incomplete until they are not considered with respect to the reciprocity between the system and its environment, because this emergent relational domain globally constrains the structural processes. Consequently, the relational domain of organisms as units of action is operationally efficient, which is to say, ontologically real and necessary for the explanation of behavior.

Finally, the perspective that I propose considers the multiplicity of emergent scales of interaction with the environment as one of the fundamental properties of organisms. The nested functional scales are not reducible one to another, but, rather, they are mutually constraining processes that circularly cause each other. What at one scale emerges as a collective process, acts as a component of an emerging collective at another scale. Distributed models of control are therefore considered more appropriate to explain behavior. In such models, regulation is carried out by networks of interacting processes at multiple scales. To account for the vertical coupling between processes at different scales, the effects of processes occurring at other scales must be expressed in the scale of the considered process, either as local constraints on the intrinsic dynamics of the components in the case of smaller scale processes, or as global constraints that collectively coordinate components for larger scale processes.

As a consequence of the scaling-up of the processes of a system that shows environmental emergence, the system can mobilize more energy for longer periods of time. The immediacy of the energetic and material dependence of the system is reduced, and responses to changes in the environment need not be reactive or necessary, but instead, may be based on objectives defined autonomously by the system. In the introduction to this thesis I have proposed a classification of the modes in which an environmentally emergent complex system can establish a dialectic (i.e., a reciprocal generative interaction) with its environment. The criterion used to classify these dialectic modes was the level of "artificiality" of their behavior in Simon's sense, that is, the extent to which the evolution of the system is determined by autonomously specified objectives or by necessary natural laws.

The simplest mode of environmental dialectic is the dissipative one, charac-

teristic of physical systems that spontaneously produce states of global coherence in response to energizing environmental conditions. In a dissipative dialectic, the work generated by the system has the sole purpose of canceling the local disequilibrium with the environment. For this reason, the permanency in the time of the system depends on the environment being able to maintain the disequilibrium despite the dissipative effect of the dynamics of the system. The second dialectic mode that I have proposed is the metabolic one, which, unlike the dissipative one, possesses an intrinsic teleology that consists in its own preservation. Because of this self-preserving dialectic, metabolic systems are the simplest natural systems that can develop a history of interactions with the environment, the fundamental transition in the specialization of the natural processes into the biological processes. The effects of environmental perturbations on the homeostatic network define the perspective from which the system gives meaning to its environment. In these systems, meaning is not something extrinsically imposed on the natural order, but an intrinsic consequence of the self-preservation.

In this thesis I have argued that a metabolic dialectic with the environment (based on direct control of relevant energy and matter flows) cannot fully account for the relations of (even the simplest) living organisms with their environments. These interactions pertain to the organism as a unit, and requires systems capable of an informational dialectic with their environment. In the informational dialectic mode, the organism as an operational unit regulates its interactions with the environment based on information present in the structure of environmental low-energy arrays. The essential difference with strictly metabolic systems is that in an informational dialectic, the system is agentially involved with its environment, which is to say, it interacts with the environment as a unit of action. The generation of agential systems from metabolic systems requires two fundamental transitions. First, it requires access to scales of interaction far enough from the stochasticity of the molecular environment, because the perturbations at the molecular scale are always instructive due to their high relative energy. Second, it requires the incorporation of the system's boundary to the network of homeostatic processes. These two transitions allow the system to adapt its behavior to the environment by appropriately coupling the low-energy perceptual information to the high-energy forces generated by the dissipative processes of the action system. In informational interactions, the energy in the environment does not have a direct causal role on behavior. Energy is not instructive, but specifica-

tional: The distribution of energy in the environment can uniquely specify the behavioral possibilities of an organism but it cannot determine the behaviour.

For the ecological theory of perception, perceptually-guided behavioral adaptations do not require meaningful intermediate states. The meaning of an action is defined at the ecological scale, this is, in the relational domain of the organism as unit of action, and not in the organic domain. According to the ecological theory, perception can be direct (in opposition with indirect or inferential) because the patterns of low energy that affect the sensory surfaces are not ambiguous or noisy, but as structured as the environmental processes that generate them. The intermediate organic states do not symbolically encode for the state of affairs in the world (our brain does not contain representations of the world), they only carry out specific organizations of the processes of detection and control. Perceptual systems are said to be smart because of this ability to self-organize so as to resonate parts of their organization with relevant parts of the environment, resulting in the adaptive control of an action to achieve an intentionally specified goal. Ecological psychology defines knowledge as an adaptive know-how that requires both the detection of relevant properties of the environment and the direct control of action on the basis of the detected information. Thus, perception and action are dual processes, mutually constrained in a circular causal loop because they serve to the same goal: obtaining a resource (or actualizing an affordance). If there is a mismatch in the specificity of the perception-action loop, processes at longer time scales directly restore it on the basis of information for learning that is present in the consequences of our misguided actions.

Throughout this thesis I have attempted to show how informational specificity and the self-organization processes can account for behavioral adaptations. Direct perception and action show that adaptative behaviors are possible without central regulators that symbolically represent the world. Even so, the fundamental psychological concept of the ecological approach is the one of affordance. This concept combines the three features of the behavioral adaptations that were absent in a mechanistic approach: materiality, historical identity, and autonomy. The autonomy of the individual is the starting point of the ecological approach, because the approach proposes a naturalized first person psychology that considers perception as an achievement of the individual to maintain contact with the world. The autonomy of the agent shows its operational efficiency in the ecological scale through intentional constraints on the perception-action loop. In the

ecological approach, the historical identity of the subject is expressed in the dynamics of behavioral adaptations (such as calibration or education of attention) that maintain the specificity of behavior in the relational domain of the organism. Finally, the materiality of the processes in ecological theory is essential, because the adaptive control of perception and action builds on the opportunistic resonance between specific properties of the organism and the environment.

To study the dialectic interaction established between an organism and its environment, the ecological concept of affordance breaks with traditional dualistic dichotomies of subject-object, mind-body, and instead proposes a new type of dual (i.e., reciprocal) dichotomies, both subjective and objective, mental and physical, because they are produced in the dialectic synthesis of the organism and its environment. Ecological psychology affirms that to understand the processes of perception and action one must identify the properties of the environment that are relevant to the organism, because these properties define the object of the organism's psychological processes. Thus, affordances are opportunities for action of the organism that constitute an ontology of the environment from the perspective of the organism. Affordances are valuable because they allow the organism to acquire resources, either food, shelter, reproduction, etc. Therefore, improving the detection and use of affordances improves the use of environmental resources by an organism.

The ecological-dynamical approach to behavior stands against representationalist and mechanistic perspectives of psychology. On the one hand, the representationalist theories fragment psychological processes in incommensurable mental abilities that are connected through symbolic interfaces that impose an extrinsic meaning to the material processes of an organism. On the other hand, mechanistic theories dismiss the operational efficiency of the relational domain of organisms, describing behavior with the more or less universal laws of their structural arrangements. As argued above, both extremes have the same end result: the methodological dissolution of the object of psychology.

From an ecological-dynamical perspective, processes of behavioral adaptation are effective because they are defined in the reciprocal mutuality with the environment in which the organism develops. Achieving a functional distinction between processes of behavioral adaptation involves taking into account the spatial and temporal scales at which the processes operate, with the different scales constituting different domains of interaction and specificity with the environ-



ment. These nested scales are not independent, but mutually interdependent: The specificity of behavioral adaptations on longer scales maintain the specificity in the behavioral adaptations on shorter scales.

In this thesis I have tested the maturity and consistency of the ecological-dynamical approach by assessing its ability to explain classic psychological phenomena, concerning a variety cognitive domains or psychological functions. Thus, adopting the ecological-dynamical approach, I have proposed explanations for three experimental phenomena that are paradigmatic within cognitivism: inhibition of return (IOR; related to the domain of attention), Fitts' law (related to the domain of motor control and motor learning), and the Müller-Lyer illusion (related to the domain of perception and perceptual learning). The experimental setups, the requested behavior, and the considered magnitudes are unlike those that are typically used in the ecological-dynamical approach. In spite of this, these processes are within the realm of behavior, and therefore require a psychological explanation.

Each of these phenomena has previously received a canonical explanation from representationalist approaches. Inhibition of return has been explained with the dynamics of the attentional focus, a concept that is difficult to isolate and whose fluctuations are often attributed to "high level" symbolic processes. In Fitts' task, the explanation advanced by Fitts was that the functional dependence between the speed and accuracy of movements is caused by an inherent limitation of the information processing capacity of the sensory-motor system. Finally, in the Müller-Lyer illusion, the effect of the illusion on the estimated length has traditionally been attributed to errors in the constructive mechanisms of perception, and the reduction of this effect with practice has been explained as improvement of these constructive mechanisms.

I have proposed an alternative explanation from the ecological-dynamical approach for each task. To explain IOR, I have used a dynamic model with coupled processes evolving at different timescales that participate in the attunement of behavior to the environment. The model uses the language of dynamical systems to describe physiological and behavioral processes that are defined across a common spatial metric and that develop along a common temporal dimension. To explain the bimanual coordination in Fitts' task I have proposed a model of behavioral dynamics based on two coupled nonlinear oscillators. To explain the perception of length and perceptual learning in Müller-Lyer illusions I have used

the theories of direct perception and learning.

In the last two chapters of this thesis I analyzed the different applications of the ecological-dynamical approach in the areas of sport psychology and robotics. The two areas have specific characteristics that make them good candidates to test the ecological-dynamical approach. On the one hand, sport psychology is concerned with human activities that require the development of behavior under extreme spatiotemporal constraints, rendering the inferential processes less relevant, and enhancing the operational efficiency of the coupling between perception and action. On the other hand, robotics (especially certain types of action-oriented robotics) deals with the design of adaptive artificial systems and can directly benefit from the ecological perspective: The processes of direct perception and direct learning avoid the need to design complex symbolic algorithms. An action-oriented robotocist can focus the design problem on finding appropriate couplings between perception and action to achieve a certain behavior. In these reviews, I have used the concept of multiscale specificity from the ecological theories of direct perception and direct learning to propose new possibilities to apply the ecological-dynamical approach to sport psychology and robotics.

Finally, I want to bring up some thoughts of Robert Shaw (2003) that I consider specially appropriate to stimulate the debate about the relationships between processes of direct and indirect apprehension. Shaw discusses some of the myths that are very often critically wielded against the ecological theory of perception, in particular, its alleged rejection of indirect processes of apprehension such as perception, memory, or inferences. As a matter of fact, direct perception does not rule out any of these processes of indirect apprehension. Rather, the position of an ecological psychologist regarding these processes is one of caution, due to the belief that knowledge is not an internal state of the organism nor a state of things in the environment, but a reciprocal relationship between an organism and its environment. To that extent, cognitive processes such as memory or inference are not rejected. What is rejected is their portrayal as internal organic states. Thus, memory as a persistent and transportable knowledge is undeniably operational in animal behavior, what the ecological psychologist revolves against is the iconic portrayal of memory, which considers memory as an object in a box or as a definition to lookup in a dictionary. Instead, the memory from an ecological perspective is the ability to evoke dispositional states of the organism towards the environment, that is, the ability to have advanced or differed attunements

with the environment (to constrain perception-action loops), and not the storage of environmental states of affairs. Similarly, cognitive processes of inferential and indirect perception are required for the regulation of behavior in conditions where direct specification is not possible. However, the ecological psychologist knows that to assess the validity of indirect evidence you need, sooner or later, to link the present indirect evidence with past or future direct experience of the world. Without a former contact with reality, it is impossible to imagine how a process of inference can start.

In sum, the ecological approach is not against the use of signification relationships to explain behavior. On the contrary, the most fundamental claim is: Behavior is an inherently meaningful process in the relational domain of an organism. However, this meaning is not intrinsic to the body (an internal state), it is intrinsic to the ecological scale of the organism-environment duality. By definition, a triadic relation of signification between the object, the sign, and the interpretans entails a convention due to the referential relationship that the sign establishes: A sign links the system of interactions in which the operational efficiency of the sign is shown with system of interactions where the object of the signification lies. However, this is not to say that the propositional-representational model of knowledge is the most appropriate. Propositional theories systematically disregard the triadic relationship between networks of processes that is coordinated by a sign. These theories break the integrity of the triadic signification relationship, and focus their interest either in the network of interactions of the object (in the case of mechanistic explanations) or in the network of interactions that interprets the value of the signs (as in the case of the representationalist theories). Thus, these approaches fail to explain the fundamental feature of the signification relationship: the integration of different relational domains. I have proposed an alternative approach that aims to restore the ecological integrity of the triadic signification relationship to understand how meanings are involved with the processes to which they refer. These significant relationships are found in nature since the origin of life itself. In essence, life is a natural and spontaneous process in which nature builds ever-diversifying local perspectives of itself founded on local processes of global coordination.

---

## Chapter 8

# Conclusión

A lo largo de su breve historia, la psicología ha estado fuertemente condicionada por la hegemonía de las explicaciones mecanicistas en el ámbito científico. Como consecuencia, la psicología se encuentra atravesada por una fractura ontológica desde la que se formulan teorías psicológicas que escinden la experiencia unitaria del sujeto en partes inconmensurables. En esta tesis he presentado reflexiones que pretenden superar esa fractura reconsiderando el objeto y los métodos de la psicología. Sin negar la utilidad de aproximaciones analíticas y cuantitativas (más bien al contrario, haciendo un uso de estas metodologías adecuado a los problemas estudiados), he planteado un enfoque alternativo desde el que observar los fenómenos psicológicos que se fundamenta en los conceptos de la teoría ecológica de la percepción. A continuación recapitulo brevemente la problemática desde la que he planteado mi investigación, para posteriormente exponer las aportaciones de mi trabajo y terminar con una reflexión más general acerca de los límites explicativos del paradigma ecológico.

La revolución histórica que supuso la nueva ciencia de Galileo y Newton tuvo como consecuencia la adopción de su paradigma de investigación mecanicista y analítico como el modelo a seguir por el resto de disciplinas científicas. Este proceso fue catalizado por el auge de las teorías filosóficas idealistas durante el Barroco y los siglos posteriores, que abrazaron el método analítico de la mecánica como el puente epistemológico que podría conectar el mundo espiritual y necesario de las ideas (la sustancia pensante) con el mundo material y contingente de los objetos (la sustancia extensa). Así, la sustancia pensante del racionalismo, regida por leyes lógicas necesarias y universales, ordena y controla las vicisitudes de los cuerpos físicos extensos gracias a su conocimiento exhaustivo de las leyes

necesarias y universales de la mecánica. La psicología como ciencia nace en medio de esta fractura entre el cuerpo (como un mecanismo sin sentido que recibe pasivamente órdenes), y la mente (como un constructo lógico e ideal que dota de sentido intelectual al mundo y lo organiza en función de sus propósitos). De la mano de Dewey hemos visto cómo la aplicación del concepto de arco reflejo en psicología, que describe los procesos psicológicos en términos de estímulos, respuestas y pensamientos, es la expresión del programa de investigación idealista y mecanicista en la psicología.

Las propuestas que se oponían a la hegemonía del paradigma mecanicista impuesto desde la física fueron perdiendo relevancia a medida que los descubrimientos teóricos y experimentales en las ciencias naturales se sucedían. Entre estos avances, los de la lógica formal fueron fundamentales para el desarrollo contemporáneo de las ciencias cognitivas. Si la mecánica y el resto de ciencias naturales nacidas bajo su amparo se ocupaban de caracterizar las leyes necesarias que rigen el mundo material, la lógica formal y la teoría de la computación podían por primera vez proponer modelos plausibles y tecnológicamente realizables de las leyes necesarias que rigen el mundo intangible de las ideas. La formalización funcional de las máquinas a través de los conceptos de algoritmo y autómata formal transformó la fractura entre el mundo de los objetos y el mundo de las ideas de la ontología idealista en la fractura entre estructura y función de la epistemología mecanicista.

La abstracción formal ofrecida por el concepto de algoritmo separa el funcionamiento de un sistema de su estructura material, es decir, un algoritmo es una lógica de funcionamiento definida de manera independiente del soporte físico que lo realiza. Lo que caracteriza a un algoritmo es el mapeo de unos estados de entrada en unos estados de salida. Estos mapeos son implementados en el soporte material sobre el que se realiza el autómata por medio de mecanismos que le son propios. De esta forma, la diferencia entre estructura y función es meramente epistemológica, una cuestión relativa al nivel de descripción que estamos empleando. A nivel estructural, las leyes físicas o químicas permiten una descripción de los mapeos simbólicos implementados por un sistema a partir sus mecanismos estructurales. Tanto la descripción funcional simbólica como la estructural son equivalentes, hablan de una misma cosa con palabras distintas, lo que justifica que para describir algoritmos tan aparentemente complicados como nuestro comportamiento se prefiera una descripción simbólica.

Los modelos de regulación central son la expresión en las ciencias del comportamiento de la distinción entre estructura y función de la epistemología mecanicista. Como continuación natural del concepto de arco reflejo, los modelos de regulación central entienden el comportamiento animal como el producto de la aplicación de una serie de reglas simbólicas y algoritmos de procesamiento de información que mapean las entradas sensoriales con las salidas motoras apropiadas. Por tanto, la metodología que propone la epistemología mecanicista consiste, por un lado, en definir propiedades y relaciones simbólicas más o menos arbitrarias que emulan la funcionalidad de un proceso natural bajo cierto contexto de simulación en base a unos criterios de validez definidos por el investigador. Por otro lado, el mecanicismo completa su explicación del comportamiento a través de la implementación de los algoritmos simbólicos en los mecanismos estructurales del sistema. Esta aproximación al comportamiento es especialmente apropiada para el diseño de sofisticados artefactos, pero tiene serios inconvenientes cuando es aplicada a la comprensión de comportamientos naturales.

El problema fundamental de esta metodología es que disuelve la experiencia unitaria del mundo que define a un organismo bien en unos mecanismos estructurales que en absoluto se refieren a ella, bien en formalizaciones arbitrarias desconectadas de la realidad material y relacional del sistema que son impuestas por el investigador para dar cuenta del complejo dominio funcional del comportamiento. El programa analítico y reduccionista del mecanicismo resuelve los problemas ontológicos del idealismo a través del concepto epistemológico de nivel de descripción y de la relación estructura-función. Sin embargo, es incapaz de evitar que la aplicación de su metodología tenga como resultado la desintegración del objeto mismo de su interés. En su búsqueda tenaz de leyes universales y necesarias para todos los dominios del quehacer científico, este paradigma es insensible al proceso más fundamental de los organismos: el establecimiento de una identidad histórica autónoma. Si describimos a un organismo desde la perspectiva estructural de sus mecanismos, su identidad histórica se diluye en la universalidad de las leyes que los gobiernan, y si lo describimos desde la perspectiva simbólica de sus funciones, su autonomía se desvanece en la arbitrariedad de unos formalismos que sólo significan en función de un observador capaz de interpretarlos.

En esta tesis he defendido un enfoque científico alternativo en el que la materialidad, la identidad histórica y la autonomía de los organismos son las propiedades fundamentales que deben ser asumidas y explicadas. El enfoque ecológico y

dinámico que propongo define a los organismos vivos como sistemas dinámicos emergentes y tiene tres diferencias principales con el enfoque mecanicista y representacionalista. En primer lugar, este enfoque considera que las escalas emergentes en un sistema complejo no son meramente epistemológicas, es decir, reducibles a descripciones alternativas a nivel de los componentes. Al contrario, estos procesos son ontológicamente emergentes, es decir, tienen una existencia real que se plasma en su eficiencia operacional para restringir globalmente los estados estructurales. Esta relación de causalidad circular entre el dominio estructural y el dominio funcional hace imposible la reducción epistémica de un sistema complejo emergente a sus mecanismos estructurales, complicando la distinción mecanicista entre estructura y función, y poniendo de relieve el papel fundamental que juega la constitución material de un sistema.

En segundo lugar, el enfoque que defiendo considera que los procesos emergentes en sistemas naturales se constituyen necesariamente en un diálogo con su entorno, por lo que el dominio relacional del sistema como unidad de acción es necesario para explicar su comportamiento. En este sentido, el enfoque dinámico y ecológico no rechaza la descripción estructural de un sistema complejo, simplemente afirma que tanto la descripción estructural como la descripción funcional del sistema serán incompletas hasta que no se planteen desde los aspectos recíprocos del entorno sobre los que se asientan los procesos emergentes porque las restricciones globales sobre sus procesos estructurales se establecen en el dominio relacional de la unidad emergente. En consecuencia, el dominio relacional de los organismos como unidades de acción es operacionalmente eficiente, es decir, ontológicamente real y necesario para la explicación del comportamiento.

Finalmente, la perspectiva que planteo propone la multiplicidad de escalas emergentes de interacción ambiental como una de las propiedades fundamentales de los organismos. Las sucesivas escalas funcionales anidadas no son reducibles unas a otras, sino que más bien se determinan mutuamente en una relación de causalidad circular. Lo que en una escala se constituye como un proceso colectivo emergente, en otra escala actúa como uno de los componentes de un colectivo emergente. Por esto, los modelos de regulación distribuidos son considerados como los más apropiados para explicar el comportamiento, ya que la responsabilidad de la regulación no recae en un componente o escala del sistema, sino en las interacciones de la red procesos que lo constituyen. Para poder dar cuenta del acoplamiento vertical entre procesos a distintas escalas, los efectos de procesos

que se verifican en otras escalas deben expresarse igualmente en la escala del proceso que nos interesa, bien sea como restricciones locales a la dinámica intrínseca de los componentes en el caso de procesos de menor escala, o como restricciones globales que coordinan colectivamente los componentes, en el caso de procesos de mayor escala.

El escalamiento de los procesos de un sistema en una emergencia ambiental permite que el sistema pueda movilizar más energía durante periodos más largos de tiempo. Como resultado, se reduce la inmediatez de su dependencia energética y material del entorno, y las respuestas a los cambios del entorno no tienen que ser reactivas o necesarias sino basadas en unos objetivos definidos autónomamente por el sistema. En la introducción a esta tesis he planteado una clasificación de los modos en que un sistema complejo ambientalmente emergente puede establecer su diálogo con el entorno. El criterio que he empleado para clasificar los modos dialécticos ha sido el nivel de "artificialidad" de su comportamiento en el sentido de Simon, es decir, el grado en el que el devenir del sistema está determinado por objetivos especificados autónomamente o por leyes naturales necesarias.

El modo más simple de constituirse dialécticamente con el entorno es el disipativo, característico de sistemas físicos auto-organizados espontáneamente en estados de coherencia global como respuesta a condiciones ambientales energizantes. En una dialéctica disipativa, el trabajo útil que genera el sistema tiene la finalidad de cancelar el desequilibrio local con el entorno que los había generado de la manera más rápida posible. Por esto, la permanencia en el tiempo del sistema depende de que el entorno sea lo suficientemente grande como para amortiguar el efecto disipativo del sistema. El segundo modo dialéctico ambiental que he propuesto es el metabólico que, al contrario que el modo disipativo, posee una auténtica teleología intrínseca que consiste en su propia conservación. Gracias a esta dialéctica de auto-conservación, los sistemas metabólicos son el sistema natural más simple que puede desarrollar una historia de interacciones con el entorno, la transición fundamental en la especialización de los procesos naturales en los procesos biológicos. Los efectos de las perturbaciones ambientales sobre la red de procesos homeostáticos delimitan la perspectiva desde la que el sistema significa su entorno. En estos sistemas, el significado no es algo que se haya de imponer extrínsecamente al orden natural, sino una más de sus manifestaciones.

En esta tesis he defendido que la dialéctica metabólica (basada en la regulación directa de los flujos energéticos y materiales relevantes para el sistema) no



es capaz de dar cuenta de las relaciones con el entorno de los organismos vivos (ni siquiera los más simples). Estas interacciones están en el dominio relacional del organismo como unidad, que se constituye en sistemas capaces de establecer una dialéctica informacional con su entorno. En una dialéctica informacional, el organismo como unidad operacional regula sus interacciones con el entorno en base a información presente en la estructura de los campos de baja energía en el ambiente. La diferencia esencial con los sistemas estrictamente metabólicos es que un sistema con una dialéctica informacional se constituye como agente de sus interacciones, ya que se relaciona con su entorno como una unidad de acción. El establecimiento de la agencialidad a partir de sistemas metabólicos requiere dos transiciones fundamentales. En primer lugar, el acceso a escalas de interacción con el entorno alejadas de la estocasticidad molecular, ya que en esta escala las perturbaciones son siempre instructivas debido al alto contenido energético relativo. En segundo lugar, la incorporación de la frontera del sistema a la red de procesos homeostáticos. Estas dos transiciones permiten al sistema adaptar su comportamiento al entorno por medio del acoplamiento apropiado entre flujos informacionales de baja energía detectados por sus procesos perceptivos y fuerzas de alta energía generadas por los procesos disipativos de su sistema de acción. En las interacciones informacionales, la energía en el entorno no tiene un papel causal directo sobre el comportamiento. La energía no es instructiva, sino especificacional, es decir, la distribución de la energía en el ambiente puede especificar unívocamente al organismo las posibilidades de adaptación de su comportamiento, pero no determinarlo.

Para la teoría ecológica de la percepción, la adaptación comportamental mediada por el proceso perceptivo no requiere de estados significativos intermedios. La significación de una acción se define en la escala ecológica, esto es, en el dominio relacional del organismo como unidad de acción y no en el dominio orgánico. Según la teoría ecológica, la percepción puede ser directa (en contraposición con indirecta o inferencial) porque los patrones de baja energía que afectan a las superficies sensoriales no son ambiguos o ruidosos, sino tan estructurados como los procesos ambientales que los generan. Los estados orgánicos intermedios no codifican simbólicamente el estado de cosas del mundo (nuestro cerebro no contiene representaciones del mundo), simplemente realizan organizaciones específicas de los procesos de detección y control. Los sistemas perceptivos se denominan inteligentes por esta capacidad de auto-organizarse para acoplar las contingencias

en su organización con las contingencias ambientales relevantes, de tal forma que el resultado conjunto del proceso de auto-organización orgánico es el control adaptativo de una acción para lograr un objetivo especificado intencionalmente en el dominio de la experiencia. La psicología ecológica define el conocimiento como un saber-hacer adaptativo que requiere tanto de la detección de propiedades del entorno, como del control de la acción basado en las propiedades detectadas. Así, percepción y acción son procesos duales, mutuamente constreñidos en un bucle causal circular, pues sirven a un mismo fin: la obtención de un recurso (o la actualización de una *affordance*). Si existe un desajuste en la especificidad del bucle percepción-acción, procesos en escalas temporales más largas se encargan de restaurarla de manera directa sobre la base de información específica para el aprendizaje presente en las consecuencias de nuestras acciones.

A lo largo de esta tesis he intentado mostrar cómo la especificidad informacional y los procesos de auto-organización pueden dar cuenta de las adaptaciones comportamentales. La percepción-acción directas nos muestran la posibilidad de comportamientos adaptativos sin necesidad de reguladores centrales que representen simbólicamente el mundo. Sin embargo, el concepto psicológico fundamental del enfoque ecológico es el de *affordance*. Este concepto reúne las tres características de las adaptaciones comportamentales que he identificado como ausentes en el método mecanicista: la materialidad, la identidad histórica y la autonomía. La autonomía del sujeto es el punto de partida del enfoque ecológico, ya que su propuesta es la de una psicología naturalizada de la primera persona que considera la percepción como un logro del individuo que le permite mantener contacto directo con el mundo. La autonomía del agente muestra su eficiencia operacional en la escala ecológica a través de las restricciones intencionales que ejerce sobre el bucle percepción. El enfoque ecológico entiende que la identidad histórica del sujeto se expresa en la dinámica de las adaptaciones (como la calibración, o la educación de la atención) que mantienen la especificidad del comportamiento en el dominio operacional del sistema como unidad de acción. Por último, la materialidad de los procesos en la teoría ecológica es esencial, ya que la percepción como control adaptativo de la acción se construye sobre la resonancia entre contingencias del organismo y contingencias del entorno.

Para estudiar el diálogo que se establece entre un organismo y su entorno, el concepto de *affordance* del enfoque ecológico rompe con las tradicionales dicotomías dualistas de sujeto-objeto, mente-cuerpo o agente-entorno, y en su lugar

propone un nuevo tipo de dicotomías duales, a la vez subjetivas y objetivas, mentales y corporales, ya que se producen en la síntesis dialéctica del organismo y su ambiente. La psicología ecológica afirma que para comprender los procesos de percepción y acción debemos identificar las propiedades del entorno que son relevantes para el organismo y que definen el objeto de sus procesos psicológicos. Así, las affordances son las posibilidades de acción del organismo en su entorno, por lo que constituyen una ontología del entorno desde la perspectiva del organismo. Las affordances son valiosas para el organismo porque permiten la adquisición de recursos para su existencia, bien sea alimentos, protección, reproducción, etc. Por tanto, una mejor detección y aprovechamiento de las affordances por parte de un organismo tiene como consecuencia un mejor aprovechamiento de los recursos ambientales.

El enfoque ecológico y dinámico para el estudio del comportamiento se posiciona frente a perspectivas representacionistas y mecanicistas de la psicología. Por un lado, las teorías representacionistas fragmentan los procesos psicológicos en facultades mentales inconmensurables que se conectan a través de interfaces simbólicos que imponen una significación extrínseca a los procesos materiales del organismo. Por otro lado, las teorías mecanicistas desprecian la eficiencia operacional del dominio relacional de los organismos, describiéndolos a través de las leyes más o menos universales de sus mecanismos estructurales. Como argumentaba más arriba, ambos extremos tienen la misma consecuencia: la disolución metodológica del objeto de estudio de la psicología.

Desde una perspectiva ecológica y dinámica, los procesos de adaptación comportamental de un organismo son efectivos porque se definen en la mutualidad recíproca con el entorno en la que se desarrollan. Distinguir funcionalmente entre distintos procesos de adaptación comportamental implica tener en cuenta las escalas espacio-temporales en las que cada proceso opera constituyendo un nuevo dominio de interacción y especificidad con el entorno. Estas escalas anidadas no son independientes, sino mutuamente interdependientes: las relaciones de especificidad de las adaptaciones comportamentales en las escalas más largas tienen como objetivo el mantener la especificidad en las adaptaciones comportamentales de las escalas más cortas.

En esta tesis he querido mostrar la madurez y consistencia del enfoque ecológico y dinámico a través de su contrastación con fenómenos clásicos de la psicología que competen a una variedad dominios cognitivos o facultades psicológicas. Con

esta finalidad he propuesto explicaciones alternativas desde el enfoque ecológico y dinámico a tres fenómenos experimentales paradigmáticos dentro del cognitivismo: la inhibición de retorno (IOR, que pertenece al dominio de la atención), la ley de Fitts (que pertenece al dominio del control y el aprendizaje motor) y la ilusión de Müller-Lyer (que pertenece al dominio de la percepción y el aprendizaje perceptivo).

Cada una de estas tareas recibió una explicación canónica desde enfoques representacionistas. Así, el fenómeno de inhibición de retorno ha sido explicado por medio de la dinámica del foco atencional, un concepto muy difícil de aislar cuyas variaciones se atribuyen en muchas ocasiones a procesos simbólicos de "alto nivel". En la tarea de Fitts, la explicación adelantada por Fitts y de mayor aceptación en la comunidad científica es que la dependencia funcional entre la velocidad y la precisión de los movimientos se debe a la limitación intrínseca en la capacidad de procesar información por parte de la "fisiología informacional" del sistema sensorio-motor. Finalmente, en el caso de la ilusión de Müller-Lyer, el efecto en la estimación de longitud de la ilusión ha sido atribuido tradicionalmente a errores en los mecanismos de construcción de las percepciones, y la disminución de dicho efecto con la práctica se ha explicado como una mejora de esos mecanismos de percepción inferencial.

En cada caso, he propuesto una explicación alternativa desde el enfoque ecológico y dinámico. Para explicar el fenómeno de IOR he empleado un modelo dinámico con procesos con escalas temporales diferentes que constantemente acoplan el comportamiento al ambiente. El modelo utiliza el lenguaje de los sistemas dinámicos para describir procesos fisiológicos y comportamentales que comparten una métrica espacial común y que se desarrollan en una dimensión temporal común. Para explicar la coordinación bimanual en la tarea de Fitts he propuesto un modelo de la dinámica comportamental basado en dos osciladores no-lineales acoplados. Para explicar la percepción de la longitud y el aprendizaje perceptivo en ilusiones de Müller-Lyer he empleado las teorías de la percepción y el aprendizaje directos.

En los dos últimos capítulos de esta tesis he presentado las aplicaciones desarrolladas bajo el enfoque ecológico y dinámico en la psicología deportiva y la robótica. Los dos ámbitos tienen características específicas que los convierten en buenos candidatos para aplicar este enfoque. Por un lado, la psicología deportiva se preocupa por actividades humanas que requieren el desarrollo de

comportamientos bajo restricciones espacio-temporales extremas, en los que los procesos inferenciales pasan a un segundo plano, y el acoplamiento entre percepción y acción se convierte en esencial para el comportamiento. Por otro lado, la robótica (especialmente, ciertos tipos de robótica orientadas a la acción) se ocupa del diseño de sistemas artificiales adaptativos, por lo que puede beneficiarse directamente de la perspectiva ecológica. Así, los procesos de percepción y aprendizaje directo evitan la necesidad de diseñar complejos algoritmos simbólicos de regulación, y centran el problema de diseño en encontrar los acoplamientos entre los sistemas de percepción y acción apropiados para obtener un cierto comportamiento. Igualmente, he propuesto nuevas posibilidades tanto en el campo de la psicología del deporte como en el campo de la robótica para aplicar el enfoque ecológico y dinámico a partir del concepto de especificidad multiescala que proponen las teorías de percepción y del aprendizaje directos.

Para terminar, quiero recuperar unas reflexiones de Robert Shaw (2003) que considero muy oportunas para estimular el debate acerca de la relación entre los procesos de aprehensión directos e indirectos. En estas reflexiones, Shaw analiza algunos de los mitos que habitualmente se esgrimen como críticas a la teoría ecológica de la percepción, en especial, el supuesto rechazo de procesos cognitivos como la percepción indirecta, la memoria o las inferencias, todos ellos característicos de modos de aprehensión indirectos. A decir verdad, la percepción directa no excluye la existencia de ninguno de estos procesos de aprehensión indirecta. Más bien, la posición de un psicólogo ecológico respecto de estos procesos es de cautela, debido a su convicción de que el conocimiento no es ni un estado interno del organismo ni un estado de cosas del entorno, es más bien un proceso relacional entre el organismo y el entorno. En esa medida, procesos cognitivos como la memoria o la inferencia no se rechazan, simplemente se rechaza su descripción a partir de estados internos. Así, la memoria como un conocimiento persistente y transportable es innegablemente operativa en el comportamiento animal, contra lo que se revuelve el psicólogo ecológico es contra su descripción icónica, que considera la memoria como un objeto almacenable en una caja o como una definición que mirar en un diccionario. Al contrario, la memoria desde una perspectiva ecológica es la capacidad de evocar estados disposicionales del organismo respecto del entorno, esto es, la capacidad de resonar anticipada o diferidamente con el entorno, y no un almacén de estados de cosas ambientales. Igualmente, los procesos inferenciales y la percepción indirecta son procesos cognitivos necesarios

para la regulación del comportamiento en condiciones en las que la especificación directa no es posible. Sin embargo, el psicólogo ecológico sabe que para evaluar la validez de evidencias indirectas uno necesita, más tarde o más temprano, ligar las evidencias indirectas presentes con experiencias directas de la realidad pasadas o futuras. Sin el postrer contacto con la realidad, resulta imposible arrancar un proceso de inferencia.

En definitiva, el enfoque ecológico no está en contra de emplear procesos de significación para explicar el comportamiento, al contrario, ésta es su propuesta fundamental: el comportamiento es un proceso relacional intrínsecamente significativo. Sin embargo, esta significación no es intrínseca al organismo (no es un estado interno), es intrínseca a la dualidad organismo-entorno. Toda relación de significación implica una indirección convencional debido a la relación de referencialidad entre el sistema de relaciones en que se muestra la eficiencia operacional de los signos, y el sistema de relaciones objeto de la significación. Sin embargo, esto no es una indicación de que el modelo proposicional de conocimiento sea el más apropiado. Al contrario, las teorías proposicionales tienden a olvidar la dimensión relacional triádica entre redes de procesos que se coordina en una relación de significación. Estas teorías escinden la integridad triádica de la relación de significación y centran su interés bien en el sistema de relaciones objeto (en el caso de explicaciones mecanicistas), bien en el sistema de relaciones que interpreta el valor de los signos (como en el caso de las teorías representacionistas). De esta forma, este enfoque está condenado a no poder explicar la característica que define la relación de significación: su integración de distintos dominios relacionales. Lo que propone el enfoque ecológico es restaurar esa integridad triádica de la relación de significación para poder comprender cómo los significados se implican con los procesos a los que se refieren. Estas relaciones de significación aparecen en la naturaleza en el origen mismo de los procesos vitales. La vida es, en esencia, un proceso natural local en el que se forman perspectivas significativas del entorno gracias a la coordinación global de sus procesos.

---

# Bibliography

- Abernethy, B., Neal, R. J. & Koning, P. (1994). Visual-perceptual and cognitive differences between experts, intermediate, and novice snooker players. *Applied Cognitive Psychology*, 8, 185-211.
- Anderson, J. R., Matessa, M., & Lebiere, C. (1997). ACT-R: A theory of higher level cognition and its relation to visual attention. *Human-Computer Interaction*, 12, 439-462.
- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science, New Series*, 177(4047), 393-396.
- Andersson, I. E. K. (2009). Realism of confidence and phenomenological reports are not congruent indicators of modes of apprehension in visual discrimination of relative mass. *Ecological Psychology*, 21, 218-244.
- Andersson, I. E. K., & Runeson, S. (2008). Realism of confidence, modes of apprehension, and variable-use in visual discrimination of relative mass. *Ecological Psychology*, 20, 1-31.
- Araújo, D. & Davids, K. (2009). Ecological approaches to cognition and action in sport and exercise: Ask not only what you do, but where you do it. *International Journal of Sport Psychology*, 20, 5-37.
- Araújo, D., Davids, K., & Hristovski, K. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychology of Sport and Exercise*, 7, 653-676.
- Araújo, D., Davids, K. W., Chow, J. Y., Passos, P., & Raab, M. (2009). The development of decision making skill in sport: An ecological dynamics perspective. In: Araújo, D. & Ripoll, H. (Eds.) *Perspectives on Cognition and Action in Sport* (pp. 157-169). Nova Science Publishers, Suffolk (NY).
- Arzamarski, R., Isenhower, R. W., Kay, B. A., Turvey, M. T., & Michaels, C. F. (2010). Effects of intention and learning on attention to information in dynamic touch. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 721-735.

- Ashby, W. R. (1956). *An introduction to cybernetics*. Chapman & Hall, London (UK).
- Barabási, A. L. (2002). *Linked: The new science of networks*. Perseus Books: Cambridge (MA).
- Barandiarán, X. E. & Egbert, M. D. (2014). Norm-establishing and norm-following in autonomous agency. *Artificial Life*, 20(1), 5-28.
- Barandiarán, X. E., Rohde, M., & Di Paolo, E. A. (2009). Defining agency: Individuality, normativity, asymmetry and spatio-temporality in action. *Adaptive Behavior*, 17, 367-386.
- Bar-Yam, Y. (2004). A mathematical theory of strong emergence using multiscale variety. *Complexity*, 9(6), 15-24.
- Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science*, 25(6), 718-732.
- Beek, P. J. (2009). Ecological approaches to sport psychology: Prospects and challenges. *International Journal of Sport Psychology*, 40, 144-151.
- Beek, P. J., Jacobs, D. M., Daffertshofer, A., & Huys, R. (2003). Expert performance in sport: Views from the joint perspectives of ecological psychology and dynamical systems theory. In: Starkes, J. & Ericsson, K. (Eds.), *Expert performance in sports: Advances in research on sport expertise* (pp. 321-344). Human Kinetics Publishers, Champaign (IL).
- Beek, P. J. & Turvey, M. T., (1992). Temporal patterning in cascade juggling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 934-947.
- Beer, R. D. (1990). *Intelligence as adaptive behavior: An experiment in computational neuroethology*. Academic Press, New York (NY).
- Bedau, M. A. (1997). Weak emergence. In: Tomberlin, J. (Ed.), *Philosophical perspectives (Volume 11): Mind, causation, and world* (pp. 375-399). Malden, Blackwell (MA).
- Bedau, M. A., & Humphreys, P. (2008). *Emergence: Contemporary readings in philosophy and science*. MIT Press, Boston (MA).
- Bell, A. H., Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2004). Using auditory and visual stimuli to investigate the behavioral and neuronal consequences of reflexive covert orienting. *Journal of Neurophysiology*, 91, 2172-2184.
- Berlucchi, G. (2006). Inhibition of return: A phenomenon in search of a mechanism and a better name. *Cognitive Neuropsychology*, 23, 1065-1074.



- 
- Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In: Latash, M. & Turvey, M. (Eds.). *Dexterity and its development* (pp. 3-244). Lawrence Erlbaum, Mahwah (NJ).
- Bootsma, R. J. & Craig C. M. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact: observer sensitivity to composite tau. *Perception*, 31, 901-924.
- Bootsma, R. J. & Mottet, D. (2004). Dynamic invariance in goal-directed aiming. *Ecological Psychology*, 16(1), 55-60.
- Bootsma, R. J., Mottet, D., & Zaal, F. T. J. M. (2004). Trajectory formation and speed-accuracy trade-off in aiming movements. *Comptes Rendus del Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 321(5), 377-383.
- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2(1), 14-23.
- Brooks, R. A. (1989). A robot that walks: Emergent behaviors from a carefully evolved network. *Neural Computation*, 1(2), 253-262.
- Brooks, R. A. (1991). New approaches to robotics. *Science*, 253(5025), 1227-1232.
- Brosvic, G. M., Farrelly, M., Risser, J. M., Shander, J., Clayton, J., Sypek, E., Kafer, L., & Dihoff, R. E. (1993). Müller-Lyer illusion and the structure-strategy dichotomy. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31, 11-12.
- Brosvic, G. M. & Finizio, S. (1995). Innacurate feedback and performance on the Müller-Lyer illusion. *Perceptual and Motor Skills*, 80, 896-898.
- Bruggeman, H., Zosh, W. D., & Warren, W. H. (2007). Optic flow drives human visuo-motor adaptation. *Current Biology*, 17(23), 2035-2040.
- Calvo Garzón, F. (2008). Towards a general theory of antirepresentationalism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 59, 259-292.
- Cañal-Bruland, R., van der Kamp, J., Arkesteijn, M., Janssen, R. G., van Kesteren, J., & Savelsbergh, G. J. P. (2010). Visual search behaviour in skilled field-hockey goalkeepers. *International Journal of Sport Psychology*, 41, 327-339.
- Carello, C., Turvey, M. T., Kugler, P. N., & Shaw, R. E. (1984). Inadequacies of the computer metaphor. In: Gazzaniga, M. S. (Ed.). *Handbook of Cognitive Neuroscience* (pp. 229-248). Plenum, New York (NY).
- Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics*, 36(10), 868-870.
- Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax*. MIT Press, Cambrigde

- (MA).
- Conant, R. C., & Ashby, W. R. (1970). Every good regulator of a system must be a model of that system. *International Journal of Systems Science*, 1, 89-97.
- Connell, J. H. (1987). Creature design with the subsumption architecture. *Proceedings of the Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 87, 1124-1126.
- Connell, J. H. (1990). *Minimalistic mobile robotics: A colony-style architecture for an artificial creature*. Academic Press, New York (NY).
- Corning, P. A. (2002). The re-emergence of "emergence": A venerable concept in search of a theory. *Complexity*, 7, 18-30.
- Craig, C. M., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. J. (2006). Judging where a ball will go: The case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften*, 93, 97-101.
- Danziger, S., Fendrich, R., & Rafal, R. D. (1997). Inhibitory tagging of locations in the blind field of hemianopic patients. *Consciousness and Cognition*, 6, 291-307.
- Dewey, J. (1990). El concepto de arco reflejo. In: Gondra, J. M. (editor y traductor), *La psicología moderna* (pp. 197-208). Editorial Desclee de Brouwer, Bilbao. Originally published in 1896.
- Diniz, A., Wijnants M. L., Torre, K., Barreiros, J., Crato, N., Bosman, A. M. T., Hasselman, F., Cox, R. F. A., Van Orden, G. C., Delignières, D. (2010). Contemporary theories of 1/f noise in motor control. *Human Movement Science*, 30(5), 889-905.
- Di Paolo, A. (2005). Autopoiesis, adaptivity, teleology, agency. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4, 429-452.
- Dodd, M. D. & Pratt, J. (2007). The effect of previous trial type on inhibition of return. *Psychological Research*, 71, 411-417.
- Dorris, M. C., Klein, R. M., Everling, S., & Munoz, D. P. (2002). Contribution of the primate superior colliculus to inhibition of return. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1256-1263.
- Duchon, A. P. & Warren, W. H. (1994). Robot navigation from a Gibsonian viewpoint. *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3, 2272-2277.
- Duchon, A. P., Kaelbling, L. P., & Warren, W. H. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6(3-4), 473-507.

- 
- Duchon, A. P., Warren, W. H., & Kaelbling, L. P. (1995). Ecological robotics: Controlling behavior with optical flow. In: Moore, J. D. & Lehman, J. F. (Eds.). *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science* (pp. 164-169). University of Pittsburgh, Pittsburgh (PA).
- Dukewich, K. R. (2009). Reconceptualizing inhibition of return as habituation of the orienting response. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 238-251.
- Effken, J. A. & Shaw, R. E. (1992). Ecological perspectives on the new artificial intelligence. *Ecological Psychology*, 4(4), 247-270.
- Elman, J. L., Bates, E. A., Johnson, M. H., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development*. MIT Press, Cambridge (MA).
- Erlhagen, W. & Schöner, G. (2002). Dynamic field theory of movement preparation. *Psychological Review*, 109, 545-572.
- Fajen, B. R. (2008). Learning novel mappings from optic flow to the control of action. *Journal of Vision*, 8(11), 1-12.
- Fajen, B. R. & Devaney, M. C. (2006). Learning to control collisions: the role of perceptual attunement and action boundaries. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 300-313.
- Fajen, B. R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2009). Information, affordances, and the control of action in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 40, 79-107.
- Fecteau, J. H., Bell, A. H., & Munoz, D. P. (2004). Neural correlates of the automatic and goal-driven biases in orienting spatial attention. *Journal of Neurophysiology*, 92, 1728-1737.
- Fecteau, J. H. & Munoz, D. P. (2003). Exploring the consequences of the previous trial. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 435-443.
- Fecteau, J. H. & Munoz, D. P. (2005). Correlates of capture of attention and inhibition of return across stages of visual processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 1714-1727.
- Feldman, A. G. (1986). Once more on the equilibrium-point hypothesis ( $\lambda$ -model) for motor control. *Journal of Motor Behavior*, 18, 17-54.
- Feldman, A. G., Gousev, V., Sangole, A., & Levin, M. F. (2007). Threshold position control and the principle of minimal interaction in motor actions. *Progress in Brain Research*, 165, 267-281.
- Fernandez, L. & Bootsma, R. J. (2004). Effects of biomechanical and task con-

- straints on the organization of movement in precision aiming. *Experimental Brain Research*, 159(4), 458-466.
- Fink, P. W., Foo, P. S., & Warren, W. H. (2009). Catching fly balls in virtual reality: A critical test of the outfielder problem. *Journal of Vision*, 9(13), 1-8.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Fitts, P. M. & Peterson, J. R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2), 103-112.
- Fodor, J. A. (1975). *The language of thought*. Crowell Press, Harvard (NY).
- Fodor, J. A. & Pylyshyn, Z. W. (1981). How direct is visual perception? Some reflections on Gibson's "Ecological Approach". *Cognition*, 9(2), 139-196.
- Ford, P., Hodges, N. J., Huys, R., & Williams, A. M. (2006). The role of external action-effects in the execution of a soccer kick: A comparison across skill-level. *Motor Control*, 10, 386-404.
- Fowler, C. & Turvey, M. T. (1978). Skill acquisition: An event approach with special reference to searching for the optimum of a function of several variables. In Stelmach, G. E. (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (pp. 1-40). Academic Press, New York (NY).
- Franceschini, N., Ruffier, F., Serres, J., & Viollet, S. (2009). Optic flow based visual guidance: From flying insects to miniature aerial vehicles. In: Lam, T. M. (Ed.). *Aerial vehicles* (pp. 747-770). InTech, Croatia.
- Garrido, M (1974). *Lógica simbólica*. Editorial Technos, Madrid.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin, Boston (MA).
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin, Boston (MA).
- Gómez, M. & Botella, J. (2005). El papel del feedback y la experiencia en la apreciación del "Fuera de Juego" en fútbol. *Revista de Psicología del Deporte*, 14, 57-76.
- Gottlieb, G. (2007). Probabilistic epigenesis. *Developmental Science*, 10(1), 1-11.
- Guiard, Y. (1993). On Fitts' and Hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 139-159.

- 
- Hajnal, A., Grocki, M., Jacobs, D. M., Zaal, F. T. J. M., & Michaels, C. F. (2006). Mode transition and change in variable use in perceptual learning. *Ecological Psychology, 18*, 67-91.
- Haken, H. (1977). *Synergetics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Haken, H. (1983). *Advanced synergetics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics, 51*(5), 347-356.
- Heath, M., Rival, C., & Neely, K. (2006). Visual feedback schedules influence visuomotor resistance to the Müller-Lyer figures. *Experimental Brain Research, 168*, 348-356.
- Hecht, H. (1996). Heuristics and invariants in dynamic event perception: Immunized concepts or nonstatements? *Psychonomic Bulletin & Review, 3*, 61-70.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics, 4*, 1-23.
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 79*, 2554-2558.
- Huet, M., Jacobs, D. M., Camachon, C., Missenard, O., Gray, R., & Montagne, G. (2011). The education of attention as explanation of variability-of-practice effects: learning the final approach phase in a flight simulator. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 37*(6), 1841-1854.
- Hutchison, V. H., Haines, H. B., & Engbretson, G. (1976). Aquatic life at high altitude: Respiratory adaptations in the Lake Titicaca frog, *Telmatobius culeus*. *Respiratory Physiology, 27*(1), 115-29.
- Huys, R., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2004). Multiple time scales and subsystem embedding in the learning of juggling. *Human Movement Science, 23*(3-4), 315-36.
- Huys, R., Fernandez, L., Bootsma, R. J., & Jirsa, V. K. (2009). Fitts' law is not continuous in reciprocal aiming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 277*(1685), 1179-1184.
- Huys, R., Smeeton, N. J., Hodges, N. J., Beek, P. J. & Williams, A. M. (2008). On the dynamic information underlying visual anticipation skill. *Perception & Psychophysics, 70*, 1217-1234.

- Ibáñez, J., Travieso, D., Jacobs, D. M., & Fernández, M. (2010). Towards a dynamic field model of inhibition of return. [Abstract] *International Journal of Sport Psychology*, 41, 77-78.
- Ibáñez-Gijón, J., Travieso, D., & Jacobs, D. M. (2011). Neogibsonian approach as conceptual and methodological framework for the design of training programs in sports. *Revista de Psicología del Deporte*, 20, 667-688.
- Iberall, A. S. & McCulloch W. S. (1969). The organizing principle of complex living systems. *Journal of Basic Engineering, ASME*, 91, 290-294.
- Jacobs, D. M. & Díaz, A. (2010). Judgements of time to contact are affected by rate of appearance of visible texture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(6), 1041-1048.
- Jacobs, D. M., Ibáñez, J., & Travieso, D. (2010). Information, learning, and the Müller-Lyer "illusion" [abstract]. *International Journal of Sport Psychology*, 41, 78-79.
- Jacobs, D. M., Ibáñez-Gijón, J., Díaz, A., & Travieso, D. (2011). On potential-based and direct movements in information spaces. *Ecological Psychology*, 23(2), 123-145.
- Jacobs, D. M. & Michaels, C. F. (2002). On the apparent paradox of learning and realism. *Ecological Psychology*, 14, 127-139.
- Jacobs, D. M. & Michaels, C. F. (2006). Lateral interception I: Operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(2), 443-458.
- Jacobs, D. M. & Michaels, C. F. (2007). Direct learning. *Ecological Psychology*, 19(4), 321-349.
- Jacobs, D. M., Runeson, S., & Michaels, C. F. (2001). Learning to perceive the relative mass of colliding balls in globally and locally constrained task ecologies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 1019-1038.
- Jacobs, D. M., Silva, P. L., & Calvo, J. (2009). An empirical illustration and formalization of the theory of direct learning: The muscle-based perception of kinetic properties. *Ecological Psychology*, 21(3), 245-289.
- Jacobs, D. M., Vaz, D. V., & Michaels, C. F. (2012). The learning of visually-guided action: An information-space analysis of pole balancing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(5), 1215-1227.

- 
- Jirsa, V. K. & Kelso, J. A. S. (2005). The excitator as a minimal model for the coordination dynamics of discrete and rhythmic movements. *Journal of Motor Behavior*, 37, 35-51.
- Jonas, H. (2001). *The Phenomenon of life: Toward a philosophical biology. Studies in phenomenology and existential philosophy*. Northwestern University Press, Evanston (IL). Originally published in 1966.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6, Pt. 1), 387-403.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self organization of brain and behavior*. MIT Press, Cambridge (MA).
- Kelso, J. A. S. & Schöner, G. (1987). Toward a physical (synergetic) theory of biological coordination. *Springer Proceedings in Physics*, 19, 224-237.
- Kelso, J. A. S., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979). On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5(2), 229-238.
- Kelty-Stephen, D. G., Palatinus, K., Saltzman, E., & Dixon, J. A. (2013). A tutorial on multifractality, cascades, and interactivity for empirical time series in ecological science. *Ecological Psychology*, 25(1), 1-62.
- Kim, N. G. & Turvey, M. T. (1998). Optical flow fields and Bernstein's "modeling of the future". In: Latash, M. L. (Ed.). *Progress in motor control, Vol 1: Bernstein's traditions in movement studies* (pp. 221-265). Human Kinetics, Champaign (IL).
- Klein, R. M. (2000). Inhibition of return. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 138-147.
- Klein, R. M. & Kerr, B. (1974). Visual signal detection and the locus of foreperiod effects. *Memory & Cognition*, 2, 431-435.
- Kugler, P. N. & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale (NJ).
- Kull, K. (2001). Jakob von Uexküll: An introduction. *Semiotica*, 134 (1), 1-59.
- Latash, M. L. (2010). Motor synergies and the equilibrium-point hypothesis. *Motor control*, 14(3), 294-232.
- Lee, D. N., (1998). Guiding movement by coupling taus. *Ecological Psychology*, 10(3-4), 221-250.
- Lee, D. N. & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: A paradigm of ecological optics. *Nature*, 293(5830), 293-294.

- Levins, R. & Lewontin, R. (1985). *The Dialectical Biologist*. Harvard University Press, London.
- Lopes, J. E., Araújo, D., Peres, R., Davids, K., & Barreiros, J. (2008). The dynamics of decision making in penalty kick situations in association football. *The Open Sports Sciences Journal*, 1, 24-30.
- Louveton, N., Bootsma, R. J., Guerin, P., Berthelon, C., & Montagne, G. (2012). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap: Effects of task and environmental constraints. *Acta Psychologica*, 141(3), 287-294.
- Lupiañez, J., Klein, R. M., & Bartolomeo, P. (2006). Inhibition of return: Twenty years after. *Cognitive Neuropsychology*, 23, 1003-1014.
- MacKenzie, S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1), 91-139.
- Maturana, H. R. (1978). Biology of language: The epistemology of reality. In: Miller, G. & Lenneberg, E., (eds.). *Psychology and biology of language and thought*. Academic Press.
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. H. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
- McGuigan, F. J. (1959). The effect of precision, delay, and schedule of knowledge of results on performance. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 79-84.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. K. (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95(3), 340-370.
- Meyer, D. E., Smith, J. E. K., Kornblum, S., Abrams, R. A., & Wright, C. E. (1990). Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action. In: Jeannerod, M. (Ed.), *Attention and performance XIII* (pp. 173-226). Lawrence Erlbaum, Hillsdale (NJ).
- Mehta, B. & Schaal, S. (2002). Forward models in visuomotor control. *Journal of Neurophysiology*, 88(2), 942-953.
- Michaels, C. F., Arzamarski, R., Isenhower, R. W., & Jacobs, D. M. (2008). Direct learning in dynamic touch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 944-957.
- Michaels, C. F. & Carello, C. (1981). *Direct perception*. Prentice-Hall, New Jersey (NJ).
- Michaels, C. F. & Isenhower, R. W. (2011). Information space is action space: Perceiving the partial lengths of rods rotated on an axle. *Attention, Percep-*



- tion, & *Psychophysics*, 73, 160-171.
- Michaels, C. F. & Romaniak-Gross, C. A. (2012). Geometric specification of dynamics: Learning to visually perceive kinetic quantities from static images. *Perception*, 41(1), 93-109.
- Michaels, C. F. & de Vries, M. M. (1998). Higher order and lower order variables in the visual perception of relative pulling force. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 526-546.
- Minsky, M. (1961). Steps toward artificial intelligence. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 49, 8-30.
- Miyazaki, F., & Mori, R. (2004). Realization of ball catching task using a mobile robot. *2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control*, 1, 58-63.
- Montagne, G. (2005). Prospective control in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 36, 127-150.
- Morice, A. H. P., François, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, 202(2), 397-411.
- Mossio, M. & Taraborelli, D. (2008). Action-dependent perceptual invariants: From ecological to sensorimotor approaches. *Consciousness & Cognition*, 17(4), 1324-1340.
- Mottet, D. & Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80(4), 235-245.
- Müller, S. & Abernethy, B. (2006). Batting with occluded vision: An in situ examination of the information pick-up and interceptive skills of high- and low-skilled cricket batsmen. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9, 446-458.
- Murphy, M. P., Saunders, A., Moreira, C., Rizzi, A. A., & Raibert, M. (2011) The LittleDog robot. *International Journal of Robotics Research*, 30(2), 145-149.
- Nagel, E. & Newman, J. R. (1994). *El teorema de Gödel*. Editorial Technos, Madrid.
- Nakanishi, J., Cory, R., Mistry, M., Peters, J., & Schaal, S. (2008). Operational space control: A theoretical and empirical comparison. *International Journal of Robotics Research*, 27(6), 737-757.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. Appleton-Century-Crofts, New York (NY).

- Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual Review of Psychology*, 42(1), 213-237.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1976). Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Communications of the ACM*, 19(3), 113-126.
- Olberg, R. M., Worthington, A. H., & Venator, K. R. (2000). Prey pursuit and interception in dragonflies. *Journal of Comparative Physiology A*, 186, 155-162.
- Olejnik, S., Li, J., Supattathum, S., & Huberty, C.J. (1997). Multiple testing and statistical power with modified Bonferroni procedures. *Journal of educational and behavioral statistics*, 22(4), 389-406.
- O'Regan, J. K. & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral & Brain Sciences*, 24(5), 939-973.
- Oudejans, R. D., Verheijen, R., Bakker, F. C., Gerrits, J. C., Steinbrückner, M., & Beek, P. J. (2000). Errors in judging "offside" in football. *Nature*, 404, 33.
- Oyama, S., Griffiths, P. E., & Gray, R. D. (2001). *Cycles of contingency: Developmental systems and evolution*. The MIT Press, Cambridge (MA).
- Pattee, H. H. (1972). Laws and constraints, symbols and languages. In: Waddington, C. H. (ed.), *Towards a theoretical biology*, (pp. 248-258). Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Pattee, H. H. (1982). Cell psychology: An evolutionary approach to the symbol-matter problem. *Cognition and brain theory*, 4, 325-341.
- Peirce, C. S. (1998). *Peirce on signs: Writtings on semiotics by Charles Sanders Peirce*. Edited by James Hoopes. University of North Carolina Press.
- Perdikis, D., Huys, R., & Jirsa, V. K. (2011a). Complex processes from dynamical architectures with time-scale hierarchy. *PLoS ONE*, 6, e16589.
- Perdikis, D., Huys, R., & Jirsa, V. K. (2011b). Time scale hierarchies in the functional organization of complex behaviors. *PLoS Computational Biology*, 7, e1002198.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2003). *Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge Nonlinear Science Series, Cambridge University Press, Cambridge (MA).
- Polanyi, M. (1968). Life's irreducible structure. *Science*, 160, 1308-1312.
- Port, R. F. & van Gelder, T (1995). *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*. MIT Press, Cambridge (MA).
- Posner, M. I. & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In: Bouma,

- 
- H. & Bouwhuis, D. (Eds.), *Attention and performance X* (pp. 531-556). Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (NJ).
- Posner, M. I., Rafal, R. D., Choate, L. S., & Vaughan, J. (1985). Inhibition of return: Neural basis and function. *Cognitive Neuropsychology*, 2, 211-228.
- Predebon, J. (1998). Decrement of the Brentano Müller-Lyer illusion as a function of inspection time. *Perception*, 27, 183-192.
- Predebon, J. (2004). Selective attention and asymmetry in the Müller-Lyer illusion. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 916-920.
- Predebon, J. (2006). Decrement of the Müller-Lyer and Poggendorff illusions: The effects of inspection and practice. *Psychological Research*, 70, 384-394.
- Prigogine, I. (1978). Time, structure and Fluctuation. *Science*, 201, 777-784.
- Prigogine, I. & Nicolis, G. (1971). Biological order, structure and instabilities. *Quarterly Review of Biophysics*, 4, 107-148.
- Reed, E. S. (1996). *Encountering the world: Toward an ecological psychology*. Oxford University Press, New York (NY).
- Richardson, M. J., Shockley, K., Riley, M. R., Fajen, B. R., & Turvey, M. T. (2008). Ecological psychology: Six principles for an embodied-embedded approach to behavior. In: Calvo, P. & Gomila, T. (eds.), *Elsevier handbook of new directions in cognitive science*, pp. 161-190.
- Riek, S., Tresilian, J. R., Mon-Williams, M., Coppard, V. L., & Carson, R. G. (2003). Bimanual aiming and overt attention: One law for two hands. *Experimental Brain Research*, 153(1), 59-75.
- Rodríguez, C. & Moro, C. (1998). *El mágico número tres: cuando los niños aún no hablan*. Paidós Ibérica, Barcelona.
- Rosen, R. (1970). Structural and functional considerations in the modeling of biological organization. *Center for Theoretical Biology, State University of New York at Buffalo*, 77(25), 1-12.
- Ruffier, F. & Franceschini, N. (2003). OCTAVE, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air-vehicles. In: Rodriguez-Vázquez et al., (Eds.). *Bioengineered and bioinspired systems* (pp. 1-12). Bellingham (WA).
- Ruffier, F., & Franceschini, N. (2008). Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS08)* (pp. 1266-1273). Nice, France.
- de Rugy, A., Taga, G., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002).

- Perception-action coupling model for human locomotor pointing. *Biological Cybernetics*, 87(2), 141-150.
- Runeson, S. (1977). On the possibility of 'smart' perceptual mechanisms. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18(1), 172-179.
- Runeson, S. (1988). The distorted room illusion, equivalent configurations, and the specificity of static optic arrays. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 295-304.
- Runeson, S. (1994). Psychophysics: The failure of an elementaristic dream. *Behavioral & Brain Sciences*, 17, 761-763.
- Runeson, S. & Andersson, I. E. K. (2007). Achievement of specificational information usage with true and false feedback in learning a visual relative-mass discrimination task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33, 163-182.
- Runeson, S., Juslin, P., & Olsson, H. (2000). Visual perception of dynamic properties: Cue heuristics versus direct-perceptual competence. *Psychological Review*, 107, 525-555.
- Ryan, A. J. (2007). Emergence is coupled to scope, not level. *Complexity*, 13(2).
- Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95, 355-386.
- Satel, J., Wang, Z., Trappenberg, T. P., & Klein, R. M. (2011). Modeling inhibition of return as short-term depression of early sensory input to the superior colliculus. *Vision Research*, 51, 987-996.
- Saxberg, B. V. H. (1987). Projected free fall trajectories. I. Theory and simulation. *Biological Cybernetics*, 56, 159-175.
- Schiano, D. J. & Jordan, K. (1990). Müller-Lyer decrement: Practice or prolonged inspection? *Perception*, 19, 307-316.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Human Kinetics, Champaign (IL).
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T. Jr. (1979). Motor output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86(5), 415-451.
- Schneirla, T. C. (1966). Behavioral development and comparative psychology. *The Quarterly Review of Biology*, 41(3), 283-302.
- Schöllhorn, W., Beckmann, H., Michelbrink, M., Trockel, M., Sechelmann, M.,

- 
- & Davids, K. (2006). Does noise provide a basis for unifying different motor learning theories? *International Journal of Sport Psychology*, 2, 34-42.
- Scholz, J. P. & Schöner G. (1999). The uncontrolled manifold concept: Identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, 126(3), 289-306.
- Shaw, R. (2003). The agent-environment interface: Simon's indirect or Gibson's direct coupling? *Ecological Psychology*, 15(1), 37-106.
- Shaw, R., Kadar, E., & Kinsella-Shaw, J. (1994). Modelling systems with intentional dynamics: A lesson from quantum mechanics. In: Pribram, K. (ed.). *Origins: Brain & Self-Organization*, (pp. 53-101). Lawrence Erlbaum, Hillsdale (NJ).
- Shaw, R. & Kinsella-Shaw, J. (1988). Ecological mechanics: A physical geometry for intentional constraints. *Human Movement Science*, 7, 155-200.
- Shaw, R., Kugler, P., & Kinsella-Shaw, J. (1990). Reciprocities of intentional systems. In: Warren, R. & Wertheim, A. H., *Perception & Control of Self-Motion*, (pp. 579-619).
- Shaw, R., Turvey, M. T., & Mace, W. M. (1982). Ecological psychology: The consequence of a commitment to realism. In: Weimer, W., Palermo, D. (Eds.). *Cognition and the Symbolic Processes II* (pp. 159-226). Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (NJ).
- Shaw, R. & Warren, W. H. Jr. (1985). Events and encounters as units of analysis for ecological psychology. In: Warren, W. H. Jr. & Shaw, R. E (Eds.). *Persistence and change: Proceedings of the first International Conference on Event Perception*, (pp. 1-27). Lawrence Erlbaum, Hillsdale, (NJ).
- Silva, P. L., Fonseca, S. T., & Turvey, M. T. (2010). Is tensegrity the functional architecture of the equilibrium point hypothesis? *Motor Control*, 14(3), e35-e40.
- Simon, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 467-482.
- Simon, H. A. (1980). Cognitive science: The newest science of the artificial. *Cognitive Science*, 4, 33-46.
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial*. MIT Press, Cambridge (MA). Originally published in 1967.
- Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J. J., Huys, R., Jirsa, V., & Berton, E. (2012). Is Fitts' law continuous in discrete aiming? *PLoS ONE*, 7(7), e41190.

- Smolensky, P. (1990). Tensor product variable binding and the representation of symbolic structures in connectionist systems. *Artificial Intelligence*, 46, 159-216.
- Soodak, H. & Iberall, A. (1978). Homeokinetics: A physical science for complex systems. *Science, New Series*, 201(4356), 579-582.
- Spencer, J. P. & Schöner, G. (2006). An embodied approach to cognitive systems: A dynamic neural field theory of spatial working memory. In: Sun, R. & Miyake, N. (Eds.). *Proceedings of the 28th annual conference of the cognitive science society* (pp. 2180-2185). Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah (NJ).
- Srinivasana, M. V., Lehrera, M., Kirchnera, W. H., & Zhanga, S. W. (1991). Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visual Neuroscience*, 6(5), 519-535.
- Stanard, T., Flach, J. M., Smith, M. R. H., & Warren, R. (2012). Learning to avoid collisions: A functional state space approach. *Ecological Psychology*, 24(4), 328-360.
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Perseus Books, Cambridge (MA).
- Swenson, R. (1992). Autocatakinetics, yes. Autopoiesis, no: Steps towards a unified theory of evolutionary ordering. *International Journal of General Systems*, 21(2), 207-228.
- Swenson, R. (1997). Autocatakinetics, evolution, and the law of maximum entropy production: A principled foundation towards the study of human ecology. In: Freese, L. (ed.), *Advances in Human Ecology, Vol. 6*, (pp. 1-47). Emerald Group, Bingley (UK).
- Swenson, R. & Turvey, M. T. (1991). Thermodynamic reasons for perception-action cycles. *Ecological Psychology*, 3(4), 317-348.
- Tabak, J., Senn, W., O'Donovan, M. J., & Rinzel, J. (2000). Modeling of spontaneous activity in developing spinal cord using activity-dependent depression in an excitatory network. *The Journal of Neuroscience*, 20, 3041-3056.
- Taga, G. (1998). A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance. *Biological Cybernetics*, 78(1), 9-17.
- Thelen, E. & Smith, L.B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT Press, Cambridge (MA).

- 
- Tipper, C. & Kingstone, A. (2005). Is inhibition of return a reflexive effect? *Cognition*, 97, B55-B62.
- Trappenberg, T. P., Dorris, M. C., Munoz, D. P., & Klein, R. M. (2001). A model of saccade initiation based on the competitive integration of exogenous and endogenous signals in the superior colliculus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 256-271.
- Travieso, D. (2002). Desarrollos contemporáneos en la psicología del tacto. *Psicothema*, 14, 167-173.
- Travieso, D. & Jacobs, D. M. (2009). The ecological level of analysis: Can Neogibsonian principles be applied beyond perception and action? *Integrative Psychological and Behavioral Science*, 43, 393-405.
- Trowbridge, M. H., & Cason, H. (1932). An experimental study of Thorndike's theory of learning. *Journal of General Psychology*, 7, 245-258.
- Tsagarakis, N. G., Metta, G., Sandini, G., Vernon, D., Beira, R., Becchi, F., Righetti, L., Santos-Victor, J., Ijspeert, A. J., Carrozza, M. C., & Caldwell, D. G. (2007). ICub: The design and realization of an open humanoid platform for cognitive and neuroscience research. *Advanced Robotics*, 21(10), 1151-1175.
- Tschacher, W. & Haken, H. (2007). Intentionality in non-equilibrium systems? The functional aspects of self-organized pattern formation. *New Ideas in Psychology*, 25, 1-15.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind, New Series*, 59, 433-460.
- Turvey, M. T. (1992). Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, 4, 173-187.
- Turvey, M. T. (1996). Dynamic touch. *American Psychologist*, 51, 401-490.
- Turvey, M. T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science*, 26(4), 657-697.
- Turvey, M. T. (2009). On the notion and implications of organism-environment system: Introduction. *Ecological Psychology*, 21, 93-111.
- Turvey, M. T. & Carello, C. (1986). The ecological approach to perceiving-acting: A pictorial essay. *Acta Psychologica*, 63, 133-155.
- Turvey, M. T., Shaw, R. E., & Mace, W. M. (1978). Issues in the theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In: Requin, J. (Ed.). *Attention and Performance VII* (pp. 557-595). Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (NJ).

- Turvey, M. T., Shaw, R. E., Reed, E. S., & Mace, W. M. (1981). Ecological laws of perceiving and acting: In reply to Fodor and Pylyshyn (1981). *Cognition*, 9(3), 237-304.
- Valenza, E., Simion, F., & Umiltá, C. (1995). Inhibition of return in newborn infants. *Infant Behavior & Development*, 17, 293-302.
- Varela, F. J. (1994). Autopoiesis and a biology of intentionality. In: McMullin, B. & Murphy, N. (eds.). *Autopoiesis & Perception*, Proceedings of a workshop held at Dublin City University on August 25th & 26th, 1992.
- Varela, F. J. & Maturana, H. R. (1973). *De máquinas y seres vivos: Una teoría sobre la organización biológica*. Editorial Universitaria, Santiago de Chile. Segunda edición revisada en 1994.
- Varela, F. J., Maturana, H. R., & Uribe, R. (1974). Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5, 187-196.
- Van Mourik, A. M., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2006). Deterministic and stochastic features of rhythmic human movement. *Biological Cybernetics*, 94(3), 233-244.
- Van Orden, G. C., Moreno, M. A., & Holden J. G. (2003). A proper metaphysics for cognitive performance. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 7(1), 49-60.
- Vasconcelos, J. A., Saldanha, R. R., Krähenbühl, L., & Nicolas, A. (1997). Genetic algorithm coupled with a deterministic method for optimization in electromagnetics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33, 1860-1863.
- Viswanathan, N., Magnuson, J. S., & Fowler, C. A. (2010). Compensation for coarticulation: Disentangling auditory and gestural theories of perception of coarticulatory effects in speech. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 1005-1015.
- Von Bertalanffy, L. (1949). *Problems of life: An evaluation of modern biological thought*. John Wiley: New York (NY).
- Von Bertalanffy, L. (1950). An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1, 139-164.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller, New York (NY).
- Von Neumann, J. (1966). Theory of self-reproducing automata. In: Burks, A. W. (editor) *Theory of self-reproducing automata*. University of Illinois Press, Urbana (IL). Original work published in 1949.



- 
- Wächtershäuser, G. (1988). Before enzymes and templates: Theory of surface metabolism. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 52(4), 452-484.
- Ward, P., Williams, A. M., & Bennett, S. J. (2002). Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73, 107-112.
- Warren, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. In: Meijer, O. G. & Roth, K. (Eds.). *Complex movement behaviour: The motor-action controversy* (pp. 339-379). North-Holland, Amsterdam.
- Warren, W. H. (1998). Visually controlled locomotion: 40 years later. *Ecological Psychology*, 10(3-4), 177-219.
- Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, 113(2), 358-389.
- Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). Behavioral dynamics of human locomotion. *Ecological Psychology*, 16(1), 61-66.
- Weaver, B., Lupiáñez, J., & Watson, F. L. (1998). The effects of practice on object-based, location-based, and static-display inhibition of return. *Perception & Psychophysics*, 60, 993-1003.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine*. MIT Press, Paris.
- Wijnants, M. L., Cox, R. F. A., Hasselman, F., Bosman, A. M. T., & Van Orden, G. (2012). A trade-off study revealing nested timescales of constraint. *Frontiers in Physiology*, 3, 116.
- Wilson, D. M. (1980). Insect walking. In: Gallistel, C. R. (Ed.). *The organization of action: A new synthesis* (pp. 115-152). Lawrence Erlbaum Associates Hillsdale (NJ).
- Withagen, R. & Van Wermeskerken, M. (2009). Individual differences in learning to perceive length by dynamic touch: Evidence for variation in perceptual learning capacities. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 64-75.
- Wittgenstein, L. (2008). *Investigaciones filosóficas*. Editorial Crítica, Barcelona. Originally published in 1953.
- Wolfram, S. (1982). Cellular automata as simple self-organizing systems. *Caltech Preprint*, CALT-68-938.
- Wolfram, S. (1985). Complex systems theory. In: Pines, D. (Ed.). *Emerging syntheses in science: Proceedings of the founding workshops of the Santa Fe institute*, (pp. 261-266). Santa Fe Institute (NM).

- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3(3), 1-114.
- Zaal, F. T. J. M., & Michaels, C. F. (2003). The information for catching fly balls: Judging and intercepting virtual balls in a CAVE. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 537-555.
- Zenil, H., Gershenson, C., Marshall, J. A. R., & Rosenblueth, D. A. (2012). Life as thermodynamic evidence of algorithmic structure in natural environments. *Entropy*, 14, 2173-2191.